

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REpublique ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Télécommunications

**Spécialité** : Systèmes des Télécommunications

**Par** : OUAHRANI LATIFA  
&  
KELFAOUI SAIDA

**Sujet**

### Conception d'une antenne MIMO inspirée des MMTs pour les applications sans fil

Soutenu publiquement, en septembre 2023, devant le jury composé de :

|                         |                         |                 |              |
|-------------------------|-------------------------|-----------------|--------------|
| <b>Mme Y.BELHADEF</b>   | Maitre de conférences A | Univ de Tlemcen | Présidente   |
| <b>Mme A.SEDJELMACI</b> | Maitre de conférences B | Univ de Tlemcen | Examinatrice |
| <b>Mme H.BENOSMAN</b>   | Maitre de conférences A | Univ de Tlemcen | Encadrante   |
| <b>Mr M.A.RABAH</b>     | Maitre de recherche A   | CDS/ASAL Oran   | Co-Encadreur |

Année universitaire : 2022/2023

# **Remerciement**

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire de Télécommunication (LTT) du département de télécommunications de la Faculté de Technologie de l'Université de Tlemcen, sous la direction de Mme **BENOSMAN Hayet**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen.*

*Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de ma profonde et respectueuse gratitude pour l'encadrement spécifique, les conseils judicieux et le soutien constant qu'il m'a prodigués au cours de l'élaboration de ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à notre Co-encadrant Mr **RABAH Mohammed Amine**, et les autres professeurs qui ont toujours fait preuve d'écoute tout au long de la réalisation de ce mémoire. Merci pour votre disponibilité, votre gentillesse et pour la confiance que vous nous avez témoignés.*

*Je remercie vivement Mme **BELHADEF Yamina**, Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant la présidence du jury.*

*Je remercie respectueusement Mme **SEDJELMACI Amina** Maitre de conférences à l'université de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à tous nos proches et amis, qui nous ont constamment encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

## DEDICACE

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Leur bienveillance et leurs encouragements ont été une source de force qui m'a permis de poursuivre mes études et de mener à bien ce travail. Ce mémoire reflète les valeurs qu'ils m'ont transmises et leur dévouement à mon éducation.*

*Chère Mama et Papa, je vous aime énormément.*

*Je tiens également à dédier ce mémoire à mes frères, Rabah, Nassim Yasser et Houssein, ainsi qu'à mon mari, Mohamed Amine, qui a toujours été ma principale source d'énergie. Ma reconnaissance va également à toute ma famille, en particulier à ma grand-mère Khéra, mon grand-père Taieb, mes chères tantes Fadila, Amel et Samira, et ma cousine Zozo, pour leur amour et leur soutien inestimables. Merci du fond du cœur.*

*Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers mes amis et ma proche amie Khadija pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements constants. Leur présence et leur confiance ont été une motivation indispensable à chaque étape de ce processus de recherche.*

*À toutes les personnes qui ont croisé ma route et m'ont apporté leur aide, je vous adresse mes remerciements les plus sincères. Votre contribution a été essentielle à la réussite de ce mémoire.*

*Et à mon binôme, Ouahrani Latifa, je dédie ce travail en signe de profond respect, de gratitude éternelle et de reconnaissance infinie pour leur rôle majeur dans ma vie.*

## *Dédicace*

*Votre dédicace est très émouvante et montre clairement notre reconnaissance envers nos parents, notre famille, nos amis et toutes les personnes qui ont contribué à notre réussite dans la réalisation de ce mémoire. C'est un geste très touchant qui exprime notre gratitude et notre amour envers ceux qui nous ont soutenus tout au long de ce parcours. Notre mémoire est une belle façon de rendre hommage à toutes ces personnes qui ont été importantes dans notre vie et qui ont contribué à notre épanouissement académique et personnel. Bravo pour notre travail et notre dévouement, et félicitations pour cette réalisation significative !*

# Résumé

Les avancées technologiques dans le domaine des télécommunications sont largement attribuables à la demande croissante des utilisateurs en matière de débit et de bande passante. Pour répondre à cette demande croissante, de nouveaux systèmes doivent être développés afin de proposer des solutions aux nouvelles exigences de ce domaine. C'est dans ce contexte que la norme 5G a été établie, reposant sur l'utilisation du MIMO massif et introduisant de nouvelles bandes de fréquence, notamment des ondes millimétriques allant de 24 GHz à 60 GHz.

Les systèmes MIMO, composés de plusieurs éléments d'antenne, ont clairement montré leur capacité à améliorer les performances de communication dans des environnements caractérisés par des trajets multiples. Toutefois, la dimension des antennes et le phénomène de couplage mutuel sont deux obstacles significatifs lorsqu'il s'agit de concevoir des antennes MIMO. En effet, il existe un compromis entre la taille des antennes MIMO et le niveau de couplage mutuel.

Ce projet de mémoire présente un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) conçu pour garantir une isolation élevée dans les systèmes de communication sans fil. La configuration MIMO comprend deux éléments d'antennes positionnées de manière symétrique l'une à côté de l'autre. La méthode du découplage, qui recourt à l'utilisation de métamatériaux, est employée pour assurer une isolation efficace de l'antenne MIMO proposée. Les configurations d'antennes en réseau seront soumises à une modélisation et à des simulations à l'aide du logiciel électromagnétique CST MWS.

**Mots clés :** antennes microruban, système MIMO, couplage mutuel, CST MWS.

# Abstract

Technological advances in telecommunications are largely attributable to increasing user demand for speed and bandwidth. To meet this growing demand, new systems must be developed to provide solutions to the new requirements of this field. It is in this context that the 5G standard was established, relying on the use of massive MIMO and introducing new frequency bands, notably millimeter waves ranging from 24 GHz to 60 GHz.

MIMO systems, composed of multiple antenna elements, have clearly demonstrated their ability to improve communication performance in environments characterized by multipath. However, the size of the antennas and the phenomenon of mutual coupling are two significant obstacles when it comes to designing MIMO antennas. Indeed, there is a compromise between the size of MIMO antennas and the level of mutual coupling.

This project presents a MIMO (Multiple Input Multiple Output) system designed to ensure high isolation in wireless communication systems. The MIMO configuration includes two antenna elements positioned symmetrically next to each other. The decoupling method, which uses metamaterials, is employed to ensure effective isolation of the proposed MIMO antenna. Arrayed antenna configurations will be subjected to modeling and simulations using CST MWS electromagnetic software.

**Key words:** microstrip antennas, MIMO system, mutual coupling, CST MW

## ملخص

يعزى التقدم التكنولوجي في مجال الاتصالات إلى حد كبير إلى زيادة طلب المستخدمين على السرعة وعرض النطاق الترددي. ولتلبية هذا الطلب المتزايد، يجب تطوير أنظمة جديدة لتقديم حلول للمتطلبات الجديدة لهذا المجال. وفي هذا السياق تم إنشاء معيار G5 ، بالاعتماد على استخدام MIMO الضخم وإدخال نطاقات تردد جديدة، لا سيما الموجات المليمترية التي تتراوح من 24 جيجا هرتز إلى 60 جيجا هرتز.

لقد أثبتت أنظمة MIMO ، المكونة من عناصر هوائيات متعددة، بوضوح قدرتها على تحسين أداء الاتصال في البيئات التي تتميز بتعدد المسارات. ومع ذلك، فإن حجم الهوائيات وظاهرة الاقتران المتبادل يشكلان عائقين كبيرين عندما يتعلق الأمر بتصميم هوائيات MIMO في الواقع، هناك حل وسط بين حجم هوائيات MIMO ومستوى الاقتران المتبادل .

يقدم هذا المشروع نظام MIMO (مدخلات متعددة ومخرجات متعددة) مصمم لضمان العزل العالي في أنظمة الاتصالات اللاسلكية. يشتمل تكوين MIMO على عنصرين للهوائي موضوعين بشكل متناظر بجانب بعضهما البعض. يتم استخدام طريقة الفصل، التي تستخدم المواد الفوقية، لضمان العزل الفعال للهوائي MIMO المقترح. ستخضع تكوينات الهوائي المحاكاة باستخدام برنامج CST MWS الكهرومغناطيسي.

الكلمات الدالة: هوائيات شرائحية دقيقة، نظام MIMO، اقتران متبادل، CST MWS

|                                                                    |             |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>REMERCIEMENT .....</b>                                          | <b>I</b>    |
| <b>DEDICACE.....</b>                                               | <b>III</b>  |
| <b>RESUME.....</b>                                                 | <b>IV</b>   |
| <b>LISTE DES FIGURES.....</b>                                      | <b>X</b>    |
| <b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>                                    | <b>XII</b>  |
| <b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>                                | <b>XIII</b> |
| <b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>                                 | <b>1</b>    |
| <br><b>CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES ANTENNES IMPRIMEE ET LE</b> |             |
| <b>SYSTEME MIMO.....</b>                                           | <b>3</b>    |
| I.1 INTRODUCTION.....                                              | 4           |
| I.2 PRINCIPAUX PARAMETRES D'UNE ANTENNE .....                      | 4           |
| I.2.1 Diagramme de rayonnement .....                               | 4           |
| I.2.2 Diagramme isotropique, directionnel et omnidirectionnel..... | 5           |
| I.2.3 Impédance d'entrée .....                                     | 6           |
| I.2.4 Coefficient de réflexion.....                                | 6           |
| I.2.5 Rapport d'onde stationnaire .....                            | 7           |
| I.2.6 Fréquence de résonnance et bande passante .....              | 7           |
| I.3 LES ANTENNES IMPRIMEES .....                                   | 8           |
| I.3.1 Définition .....                                             | 8           |
| I.3.2 Description d'une antenne imprimée .....                     | 9           |
| I.3.2.1 Plan de masse, Substrat et Élément rayonnant.....          | 9           |
| I.3.3 Méthodes d'excitation :.....                                 | 10          |
| I.3.3.1 Excitation par ligne micro rubane :.....                   | 10          |
| A) Avantage : .....                                                | 10          |
| B) Inconvénients : .....                                           | 11          |
| I.3.3.2 Excitation par câble coaxial .....                         | 12          |
| A) Avantage : .....                                                | 12          |
| B) Inconvénients : .....                                           | 13          |
| I.3.3.3 Excitation par couplage électromagnétique :.....           | 13          |
| A) Avantage : .....                                                | 14          |
| B) Inconvénients : .....                                           | 14          |

|                                            |                                                                         |           |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| I.4                                        | LA TECHNOLOGIE MIMO .....                                               | 15        |
| I.4.1                                      | Définition : .....                                                      | 15        |
| I.4.2                                      | Développement et l'histoire du MIMO : .....                             | 15        |
| I.4.3                                      | Notion de diversité : .....                                             | 16        |
| I.4.4                                      | Explication générale de la technique MIMO : .....                       | 16        |
| I.4.5                                      | Les différents types de codage MIMO : .....                             | 18        |
| I.4.5.1                                    | Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) : ..... | 18        |
| I.4.5.2                                    | Le multiplexage par division spatiale (SDM) .....                       | 18        |
| I.4.5.3                                    | Le codage spatio-temporel par bloc (STBC) .....                         | 19        |
| I.4.6                                      | Types de MIMO : .....                                                   | 19        |
| I.4.6.1                                    | System SISO (Single Input Single Output) .....                          | 19        |
| A)                                         | Avantages du système SISO : .....                                       | 20        |
| B)                                         | Inconvénients du système SISO : .....                                   | 20        |
| I.4.6.2                                    | Système MISO (Multiple Input Single Output) .....                       | 21        |
| A)                                         | Avantages du système MISO : .....                                       | 22        |
| B)                                         | Inconvénients du système MISO : .....                                   | 22        |
| I.4.6.3                                    | Système SIMO (Single Input Multiple Output) : .....                     | 23        |
| A)                                         | Avantages du système SIMO : .....                                       | 24        |
| B)                                         | Inconvénients du système SIMO : .....                                   | 24        |
| I.4.6.4                                    | Système MIMO (Multiple Input Multiple Output) : .....                   | 25        |
| A)                                         | Avantages de la technologie MIMO : .....                                | 25        |
| B)                                         | Inconvénients de la technologie MIMO : .....                            | 26        |
| I.4.7                                      | Domaines d'utilisation de la technologie MIMO : .....                   | 26        |
| I.4.7.1                                    | La technologie MIMO dans le système WiMAX : .....                       | 27        |
| I.4.7.2                                    | La technologie MIMO dans le système WiFi : .....                        | 27        |
| I.4.8                                      | MIMO massif : .....                                                     | 27        |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                 |                                                                         | <b>29</b> |
| <b>CHAPITRE II: LES METAMATERIAUX.....</b> |                                                                         | <b>31</b> |
| II.1                                       | INTRODUCTION.....                                                       | 32        |
| II.2                                       | DEFINITION .....                                                        | 32        |
| II.3                                       | TERMINOLOGIE : .....                                                    | 33        |
| II.3.1                                     | Les Matériaux doublement positifs (DPS) : .....                         | 34        |
| II.3.1.1                                   | Caractéristiques des Matériaux doublement positifs (DPS) : .....        | 34        |

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.3.2 Les Matériaux à perméabilité négative (MNG): .....                                         | 34        |
| II.3.3 Les Matériaux à permittivité négative (ENG) :.....                                         | 36        |
| II.3.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG) :.....                                             | 37        |
| II.4 APPLICATIONS LIEES AUX ANTENNES : .....                                                      | 39        |
| II.5 CONCLUSION.....                                                                              | 41        |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                                        | <b>43</b> |
| <b>CHAPITRE III: SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO INSPIREE DES MMTS. 45</b>                          |           |
| III.1 INTRODUCTION.....                                                                           | 46        |
| III.2 PRESENTATION DE LOGICIEL CST : .....                                                        | 46        |
| III.2.1 Les caractéristiques de logiciels :.....                                                  | 47        |
| III.3 CONCEPTION ET SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO A DEUX ELEMENTS .....                           | 48        |
| III.3.1 Conception de l'antenne initiale.....                                                     | 48        |
| III.3.2 Conception d'un système d'antenne à deux éléments .....                                   | 49        |
| III.4 CONFIGURATION MIMO A DEUX ELEMENTS INSPIREE DES META-MATERIAUX .....                        | 50        |
| III.4.1 La cellule SRR (Split Ring Resonator) et CSRR .....                                       | 50        |
| III.4.2 Simulation des structures SRR et CSRR.....                                                | 51        |
| III.4.3 Conception et simulation de la structure CSRR sur un réseau d'antennes micro<br>ruban. 54 |           |
| III.5 RESULTATS DES SIMULATIONS .....                                                             | 56        |
| III.5.1 Paramètres S .....                                                                        | 56        |
| III.5.2 Caractéristiques de rayonnement.....                                                      | 59        |
| III.5.2.1 Diagrammes de rayonnement et gain .....                                                 | 59        |
| III.5.2.2 Coefficient de corrélation, gain de diversité .....                                     | 62        |
| III.6 CONCLUSION : .....                                                                          | 64        |
| <b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>                                                                        | <b>65</b> |
| <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>                                                                  | <b>68</b> |

## Liste des figures

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1 : Système de communication des antennes .....                                                                                                           | 4  |
| Figure I-2: Systèmes de coordonnées pour l'analyse de l'antenne [1] .....                                                                                          | 5  |
| Figure I-3: Diagramme d'antenne omnidirectionnel [1] .....                                                                                                         | 6  |
| Figure I-4 : Fréquence de résonance et bande passante .....                                                                                                        | 7  |
| Figure I-5: Exemple d'antennes patch.....                                                                                                                          | 8  |
| Figure I-6: Structure d'une antenne imprimée .....                                                                                                                 | 9  |
| Figure I-7: Excitation par ligne microbande. ....                                                                                                                  | 10 |
| Figure I-8: Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale .....                                                                                                    | 12 |
| Figure I-9: Excitation par couplage électromagnétique.....                                                                                                         | 13 |
| Figure I-10: Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO. ....                                                                                               | 16 |
| Figure I-11: Principe de système MIMO .....                                                                                                                        | 17 |
| Figure I-12 : Model du système MIMO-OFDM.....                                                                                                                      | 18 |
| Figure I-13 : Système SISO .....                                                                                                                                   | 19 |
| Figure I-14 : Système MISO.....                                                                                                                                    | 21 |
| Figure I-15 : Système SIMO.....                                                                                                                                    | 23 |
| Figure I-16 : Système MIMO .....                                                                                                                                   | 25 |
| Figure II-1 : Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité et de leur Perméabilité .....                                                     | 33 |
| Figure II-2: (a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry (b) la variation de la perméabilité effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence [3]. .... | 35 |
| Figure II-3: (a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF [3].....                                                                        | 36 |
| Figure II-4: Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques [4].....                                                                                   | 37 |
| Figure II-5 : (a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige" .....                                                         | 38 |
| Figure II-6: Cellule DNG sous forme de « $\Omega$ ».....                                                                                                           | 38 |
| Figure II-7: (a) antenne patch à large bande et leur S11, (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [5].....                       | 40 |
| Figure II-8: Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [6_7] .....                                                                            | 40 |
| Figure III-1 : Antenne patch circulaire initiale .....                                                                                                             | 48 |
| Figure III-2 : Représentation des trois couches de l'antenne : patch, plan de masse et substrat. ....                                                              | 48 |
| Figure III-3 : Géométrie du système MIMO proposé .....                                                                                                             | 50 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III-4:Cellule unitaire CSRR. (a) schéma. (b) Modèle de circuit équivalent. ....                                                                                                                                                                                 | 51 |
| Figure III-5:Module de S11 et S21 de la cellule SRR.....                                                                                                                                                                                                               | 52 |
| Figure III-6 : Paramètres effectifs de la cellule SRR.....                                                                                                                                                                                                             | 53 |
| Figure III-7:: Module de S11 et S21 de la cellule CSRR .....                                                                                                                                                                                                           | 53 |
| Figure III-8 : Paramètres effectifs de la cellule CSRR .....                                                                                                                                                                                                           | 54 |
| Figure III-9 : Vues de dessus et de dessous d'un réseau à deux éléments avec et sans éléments de découplage. (a) Sans CSRR. (b) Avec CSRR sur le plan de masse. (c) avec CSRR entre les deux patches. (d) Avec CSRR à la fois en surface et sur le plan de masse. .... | 55 |
| Figure III-10:Coefficient de réflexion de l'antenne circulaire initiale en fonction de la fréquence. ....                                                                                                                                                              | 56 |
| Figure III-11:Paramètres S du système MIMO à deux éléments sans découplage .....                                                                                                                                                                                       | 56 |
| Figure III-12 : Paramètre S du système MIMO à deux éléments : (a) coefficient S11, (b) coefficient S21. ....                                                                                                                                                           | 58 |
| Figure III-13:Distribution du courant de surface de l'antenne MIMO : a) Sans CSRR, b) avec CSRR .....                                                                                                                                                                  | 59 |
| Figure III-14 :diagramme de rayonnement simulé (avec et sans CSRR) à 25 GHz (a) $\varphi = 0^\circ$ ; (b) $\varphi = 90^\circ$ .....                                                                                                                                   | 60 |
| Figure III-15 :Variation de gain du système multi-antennes avec et sans technique de découplage pour différentes position du réseau CSRR. ....                                                                                                                         | 60 |
| Figure III-16 :Rayonnement 3Dà la fréquence 25 GHz pour l'antenne MIMO (a) sans CSRR et (b) avec CSRR.....                                                                                                                                                             | 61 |
| Figure III-17:ECC en fonction de la fréquence pour l'antenne MIMO sans et avec CSRR....                                                                                                                                                                                | 63 |
| Figure III-18:gain de diversité en fonction de la fréquence .....                                                                                                                                                                                                      | 63 |

## Liste des tableaux

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau III-1: Paramètres de l'antenne circulaire .....                   | 49 |
| Tableau III-2: Dimension de la cellule unitaire.....                      | 51 |
| Tableau III-3: Les performances de l'antenne MIMO sans et avec MMTs ..... | 61 |
| Tableau III-4 : Tableau comparatif des résultats de la littérature.....   | 61 |

# Liste des abréviations

**CST** : Computer Simulation Technology

**CSRR** : Complementary Split Ring Resonator

**DG**: Diversity Gain

**ECC**: Envelop Correlation Coefficient

**OFDM**: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**FDD**: Frequency Division Duplex

**LHM**: Left Handed Material

**MIMO**: Multiple Input Multiple Output

**MISO** : Multiple Input signal Output

**MMD**: Métamatériaux Main Droite

**MMG**: Métamatériaux Main Gauche

**MMT**: Métamatériaux

**SISO** : Signal Input Signal Output

**SIMO**: Signal Input Multiple Output

**TDD**: Time Division Duplex

**SRR**: split Ring Resonator

# Introduction générale

L'avènement des systèmes de communication sans fil a considérablement évolué ces dernières décennies, poussant les chercheurs et les ingénieurs à repousser les limites de la technologie des antennes pour répondre aux besoins croissants en termes de débit de données, de fiabilité et de couverture. Parmi les avancées majeures, les antennes MIMO (Multiple Input Multiple Output) ont émergé comme une solution de pointe pour améliorer les performances des systèmes de communication sans fil, tant dans les réseaux mobiles que dans les applications sans fil de pointe, telles que les réseaux 5G et au-delà.

Parallèlement, les métamatériaux ont ouvert de nouvelles perspectives passionnantes dans le domaine de l'ingénierie des antennes. Ces matériaux artificiels offrent la possibilité de concevoir des antennes avec des caractéristiques électromagnétiques personnalisées, ouvrant ainsi la voie à des antennes plus petites, plus efficaces et plus polyvalentes.

Dans le contexte de notre recherche, notre but est de créer une antenne MIMO qui réponde aux besoins des applications sans fil. Notre démarche de conception se fonde sur l'exploitation du logiciel de simulation électromagnétique CST Microwave Studio. Notre tâche consiste à utiliser cette solution logicielle pour évaluer divers paramètres essentiels de l'antenne, tels que le coefficient de réflexion, qui détermine son mode de fonctionnement, ainsi que le gain de l'antenne.

Ce mémoire se consacre à l'exploration et à la mise en œuvre des antennes MIMO inspirées des métamatériaux. Il se divise en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous poserons les bases en examinant les généralités sur les antennes, leur importance dans les communications sans fil, et nous plongerons dans les concepts fondamentaux des antennes MIMO. Comprendre ces concepts est essentiel pour appréhender le potentiel des antennes MIMO dans le contexte des métamatériaux.

Le deuxième chapitre est dédié à une présentation des métamatériaux. Nous explorerons leur historique, leurs principes physiques, leurs avantages ainsi que les applications potentielles de ces matériaux dans le domaine des antennes. Cette section établira la base nécessaire pour la conception de nos antennes MIMO inspirées des métamatériaux.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous mettrons en pratique nos connaissances en concevant une antenne MIMO à base des métamatériaux. Nous présenterons également les résultats de simulations qui démontrent l'efficacité de ces conceptions, ouvrant ainsi la porte à des avancées significatives dans le domaine des antennes sans fil.

**Chapitre I: GENERALITES SUR LES  
ANTENNES IMPRIMEE ET LE SYSTEME  
MIMO**

## I.1 Introduction

Selon les spécifications du standard IEEE, une antenne est un dispositif qui facilite l'émission ou la réception d'ondes radio (figure 1). Elle joue le rôle d'une interface entre l'environnement libre et le système de guidage. L'antenne prend l'énergie électrique d'un signal et la convertit en une onde électromagnétique qui se propage. Ainsi, une antenne émettrice diffuse le signal dans l'espace libre, tandis qu'une antenne réceptrice capte l'onde électromagnétique incidente et la transforme en une tension électrique.

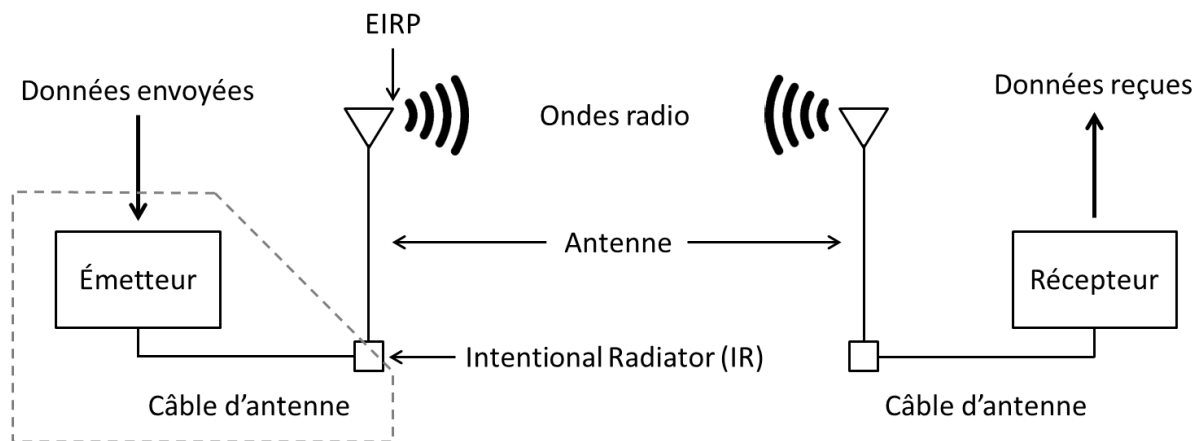


Figure I-1 : Système de communication des antennes

## I.2 Principaux paramètres d'une antenne

Les définitions de divers paramètres sont nécessaires pour décrire les performances d'une antenne. Certains paramètres sont liés entre eux et ne doivent pas être tous indiqués pour la description complète des performances de l'antenne. La plus part de ces paramètres proviennent du standards IEEE pour la définition des termes d'antennes.

### I.2.1 Diagramme de rayonnement

Un diagramme de rayonnement d'antenne est une fonction mathématique ou une représentation graphique des propriétés de rayonnement de l'antenne en fonction des coordonnées de l'espace ; et il est déterminé dans la région du champ lointain et représenté en fonction des coordonnées directionnelles. Les propriétés de rayonnement comprennent la densité du flux de puissance, l'intensité de rayonnement, le module du champ, la directivité ou la polarisation. La propriété la plus importante est la distribution spatiale en deux ou trois

dimensions de l'énergie rayonnée en fonction de la position de l'observateur. Un système de coordonnées convenable est montré sur la figure I.2. Le tracé du champ électrique (magnétique) reçu pour un rayon constant est appelé diagramme d'amplitude de champ d'amplitude. D'autre part, le tracé de la variation spatiale de la densité de puissance le long d'un rayon constant est appelé diagramme d'amplitude de puissance.

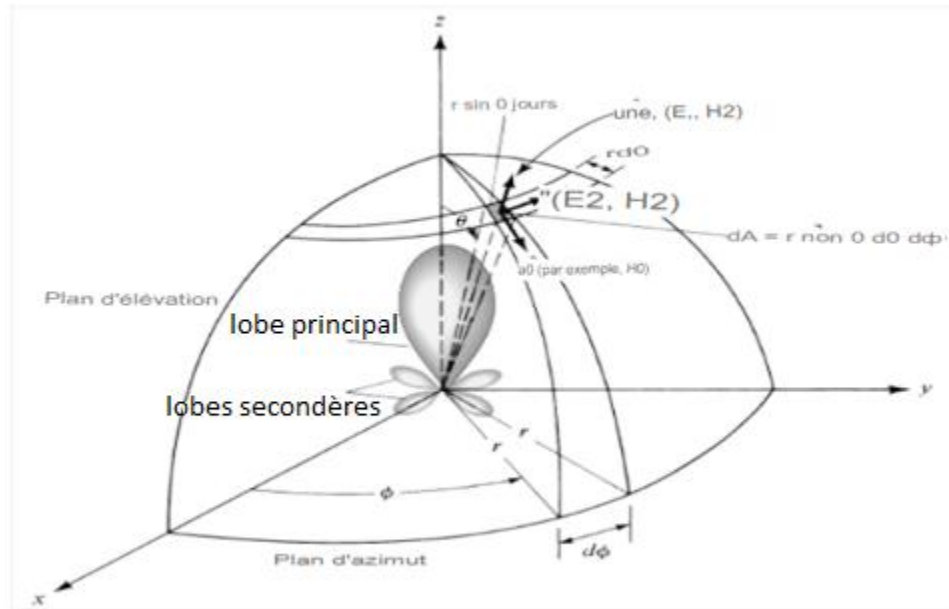


Figure I-2: Systèmes de coordonnées pour l'analyse de l'antenne [1]

### I.2.2 Diagramme isotropique, directionnel et omnidirectionnel

Un diagramme isotropique correspond à une antenne hypothétique idéale qui ne présente aucune perte et émet ou reçoit des ondes électromagnétiques de manière uniforme dans toutes les directions. Bien que cet état soit parfait et impossible à réaliser physiquement, il est couramment utilisé comme référence pour décrire les caractéristiques de direction des antennes réelles. Une antenne directionnelle est une antenne qui présente une capacité accrue à émettre ou à capter efficacement des ondes électromagnétiques dans certaines directions par rapport à d'autres. Un exemple de diagramme de rayonnement directionnel est illustré dans la figure I.3.

On peut observer que ce diagramme ne présente aucune direction privilégiée dans le plan horizontal ( $F(\Phi), \theta = \pi/2$ ) et qu'il est clairement directionnel dans le plan vertical ( $f(\Phi), \phi = \text{cts}$ ). Ce type de diagramme est dénommé omnidirectionnel, signifiant qu'il se comporte essentiellement de manière non directionnelle dans un plan donné tout en adoptant un comportement directionnel dans tout plan orthogonal. En d'autres termes, un diagramme omnidirectionnel est un cas particulier d'un diagramme directionnel.

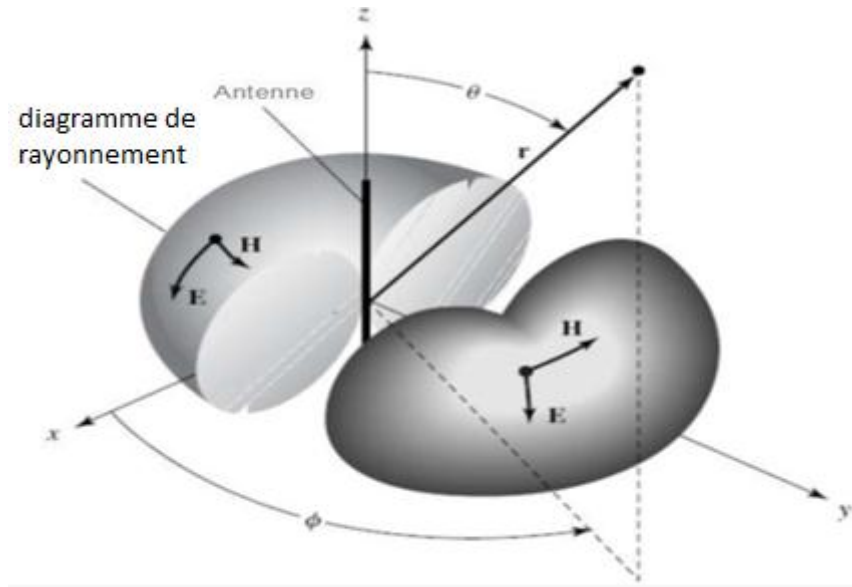


Figure I-3: Diagramme d'antenne omnidirectionnel [1]

### I.2.3 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée d'une antenne notée  $Z_A$  est définie comme l'impédance présentée par une antenne à ses bornes, comme le rapport entre la tension et le courant à ces bornes, ou encore comme le rapport entre les composantes électriques et magnétiques du champ aux accès de l'antenne.

$$Z_A = R + jX \quad (I.1)$$

Où :  $R$  : représente la partie résistive

$X$  : la composante réactive.

### I.2.4 Coefficient de réflexion

Le coefficient de réflexion est le rapport de l'amplitude entre l'onde incidente (transmise à l'antenne) et l'onde réfléchie du fait des discontinuités entre le circuit et l'antenne. En fait, lorsqu'une onde incidente change de milieu de propagation, une partie de cette onde est réfléchie, une autre partie est transmise dans le milieu.

$$|S_{11}|^2 = P_r / P_\tau \quad (I.2)$$

$P_r$  : Puissance réfléchie

$P_\tau$  : Puissance transmise

### I.2.5 Rapport d'onde stationnaire

Le rapport d'onde stationnaire, noté ROS, est déterminé à partir du coefficient de réflexion mentionné précédemment. Il permet de mesurer le degré de non-adaptation de l'impédance entre deux composants. Dans la réalité, il est rare que l'antenne soit parfaitement adaptée. Le cas où  $ROS=1$  représente le niveau minimal, indiquant une adaptation parfaite.

$$ROS = \frac{1 - |S_{11}|^2}{1 + |S_{11}|^2} \quad (I.3)$$

Avec :  $S_{11}$  : coefficient de réflexion.

### I.2.6 Fréquence de résonance et bande passante

La fréquence de résonance est celle pour laquelle la composante réelle de l'impédance d'entrée atteint son maximum, tandis que sa composante imaginaire devient nulle. La bande passante, quant à elle, englobe la plage de fréquences où le coefficient de réflexion reste en deçà d'un seuil spécifique. Au sein de cette plage, l'antenne est généralement considérée comme convenablement adaptée au circuit, ce qui signifie qu'elle présente peu de pertes dues à la désadaptation [1].

$$BP = \frac{f_1 - f_2}{f_c} \quad (I.4)$$

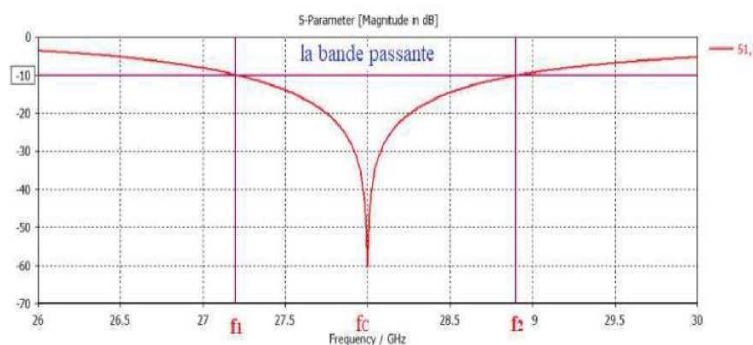


Figure I-4 : Fréquence de résonance et bande passante

### I.2.7 Directivité

C'est une propriété qui caractérise la capacité d'une antenne à focaliser l'énergie dans une direction particulière. La directivité d'une antenne est définie comme le rapport de l'intensité du rayonnement dans une direction donnée de l'antenne à l'intensité de rayonnement d'une source isotrope (la source isotrope rayonne la même puissance dans toutes les directions et son intensité de rayonnement est égale à la puissance totale rayonnée par l'antenne divisée par  $4\pi$ ).

### I.2.8 Gain

Le gain d'une antenne, dans une direction donnée, est défini comme le rapport de la densité de puissance rayonnée par l'antenne sur la densité de puissance rayonnée par une antenne isotrope de référence (antenne qui rayonne uniformément dans toutes les directions).

$$G(\theta, \varphi) = \mu D(\theta, \varphi) \quad (I.5)$$

## I.3 Les antennes imprimées

### I.3.1 Définition

Les antennes imprimées constituent une catégorie remarquable d'antennes utilisées dans divers domaines des communications sans fil et de la technologie des micro-ondes. Elles sont caractérisées par leur conception compacte, leur facilité de fabrication à grande échelle et leur capacité à offrir des performances satisfaisantes pour une gamme variée d'applications. Les antennes imprimées sont couramment employées dans les télécommunications, la télédétection, la navigation par satellite, les dispositifs IoT (Internet des objets) et bien d'autres secteurs.

Leur conception innovante repose sur des substrats imprimés, souvent en matériaux diélectriques, sur lesquels sont déposés des conducteurs métalliques, généralement sous forme de motifs géométriques spécifiques. Ces motifs métalliques déterminent les caractéristiques de rayonnement de l'antenne. Les antennes imprimées ont connu un développement significatif au fil des années, avec des avancées constantes dans leur conception et leur efficacité, les rendant essentielles dans l'ère moderne des communications sans fil [2]



Figure I-5:Exemple d'antennes patch

### I.3.2 Description d'une antenne imprimée

Dans sa configuration fondamentale (comme illustré dans la Figure I.6), une antenne imprimée se compose d'un conducteur métallique adoptant une forme quelconque, qu'il s'agisse d'une forme carrée, rectangulaire, circulaire, triangulaire, elliptique ou autre. Ce conducteur est déposé sur un substrat diélectrique, situé au-dessus d'un plan de masse. Le plan de masse est utilisé pour augmenter la puissance rayonnée par l'antenne, réduire les pertes dues à l'effet Joule et améliorer la bande passante de l'antenne. [3]

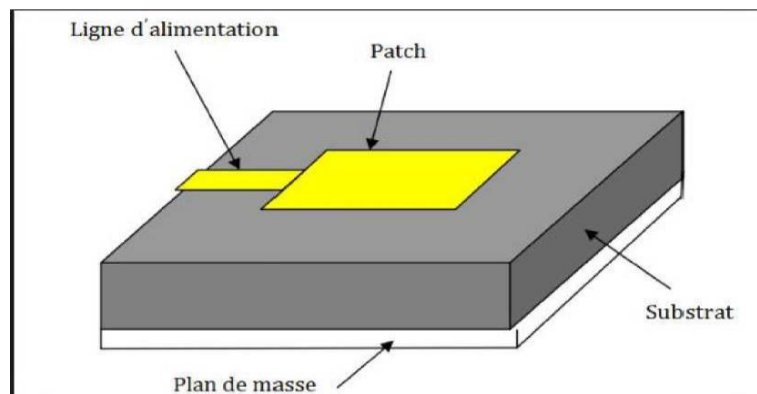


Figure I-6: Structure d'une antenne imprimée

#### I.3.2.1 Plan de masse, Substrat et Élément rayonnant

- **Le plan de masse** : En théorie, le plan de masse devrait avoir une dimension infinie, mais en pratique, il est souvent limité à environ 3 ou 4 longueurs d'onde en raison de contraintes d'espace. Cependant, il peut parfois être considérablement réduit, ce qui altère notablement les caractéristiques de l'antenne d'origine.
- **Le substrat** : Le substrat joue un rôle double dans la technologie des antennes micro-ruban. Il sert à la fois de matériau diélectrique pour la gravure des circuits et de composant mécanique pour soutenir la structure. Cette double fonctionnalité impose des exigences à la fois mécaniques et électriques, parfois difficiles à concilier. Étant généralement beaucoup plus mince que la longueur d'onde de fonctionnement, le substrat diélectrique a un impact sur le comportement et les performances électromagnétiques de l'antenne. On préfère souvent utiliser des substrats à faibles pertes diélectriques.
- **L'élément rayonnant** : Il s'agit d'un matériau conducteur de qualité, tel que le cuivre, l'argent ou l'or. Pour simplifier l'analyse et l'évaluation des performances, le patch a généralement une forme standard, qu'il s'agisse d'un rectangle, d'un cercle,

d'un triangle, d'une ellipse ou toute autre forme bien définie. Le choix de la forme de l'antenne dépendra de l'application spécifique et des paramètres à optimiser, tels que la bande passante, le gain, l'efficacité, l'impédance d'entrée, les niveaux des lobes secondaires, etc.

### I.3.3 Méthodes d'excitation :

Un point important dans l'étude et la réalisation d'antennes imprimées est leur Alimentation. Pour cela, plusieurs techniques ont été considérées dans ce but [4,5]. Les Méthodes d'alimentation des antennes micro rubane peuvent être classées en deux catégories :

- Les alimentations par contact (par sonde ou ligne micro ruban).
- Les alimentations par proximité (couplage électromagnétique par ligne ou fente).

#### I.3.3.1 Excitation par ligne micro rubane :

L'alimentation peut être réalisée en se connectant directement à une ligne microstrip (voir Figure I.7), avec le point de connexion situé soit sur l'axe de symétrie de l'élément, soit déplacé par rapport à cet axe de symétrie si cela améliore l'adaptation d'impédance [6,7].

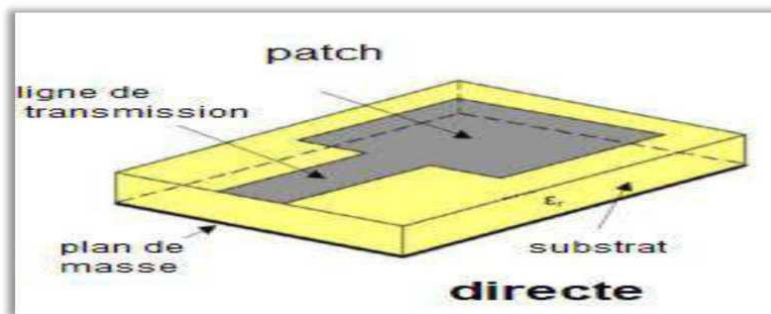


Figure I-7:Excitation par ligne microbande.

L'excitation par ligne microstrip présente à la fois des avantages et des inconvénients, en fonction de l'application spécifique et des exigences de conception. Voici une liste des avantages et des inconvénients de l'excitation par ligne microstrip :

#### A) Avantage :

- **Facilité de conception et d'intégration** : Les lignes microstrip sont relativement faciles à concevoir et à intégrer sur le substrat, ce qui permet une adaptation précise de l'impédance entre la ligne et l'élément rayonnant de l'antenne.
- **Compatibilité avec des circuits intégrés** : Les lignes microstrip sont couramment utilisées dans les circuits intégrés, ce qui les rend compatibles avec d'autres composants électroniques sur la même puce.
- **Bonne isolation électrique** : Les lignes microstrip offrent une isolation électrique adéquate entre l'antenne et d'autres composants, ce qui réduit les risques d'interférences électromagnétiques indésirables.
- **Flexibilité dans la conception** : Les lignes microstrip permettent de concevoir différentes configurations d'alimentation, notamment des points d'alimentation décalés pour optimiser l'adaptation d'impédance.
- **Adaptation d'impédance précise** : Il est relativement facile d'ajuster les paramètres de la ligne microstrip pour obtenir une adaptation précise de l'impédance entre la ligne et l'antenne.

#### B) Inconvénients :

- **Pertes de propagation** : Les lignes microstrip présentent des pertes de propagation, ce qui peut entraîner des pertes d'efficacité dans l'antenne.
- **Limitation de bande passante** : Les lignes microstrip ont une largeur de bande limitée, ce qui peut limiter la bande passante de l'antenne.
- **Complexité à haute fréquence** : À des fréquences très élevées, la conception des lignes microstrip peut devenir plus complexe en raison des effets parasites et des considérations de dispersion.
- **Sensibilité à l'environnement** : Les caractéristiques électriques des lignes microstrip peuvent être sensibles à l'environnement, notamment à l'humidité et aux variations de température.
- **Difficulté de mise en œuvre en large bande** : Concevoir des lignes microstrip pour des antennes à large bande peut être plus difficile en raison des limitations de bande passante inhérentes à ce type de ligne.

En résumé, l'excitation par ligne microstrip est courante dans de nombreuses antennes imprimées en raison de sa facilité de conception et de son intégration, mais elle présente des limitations liées à la bande passante, aux pertes de propagation et à la complexité potentielle à

des fréquences très élevées. Le choix de l'excitation dépendra des besoins spécifiques de chaque application.

### I.3.3.2 Excitation par câble coaxial

L'excitation s'effectue en connectant directement un câble coaxial (voir Figure I.8), où le conducteur central est connecté à un point situé sur l'axe de symétrie de l'élément rayonnant, généralement près de son bord. Le conducteur extérieur du câble coaxial est relié au plan de masse.

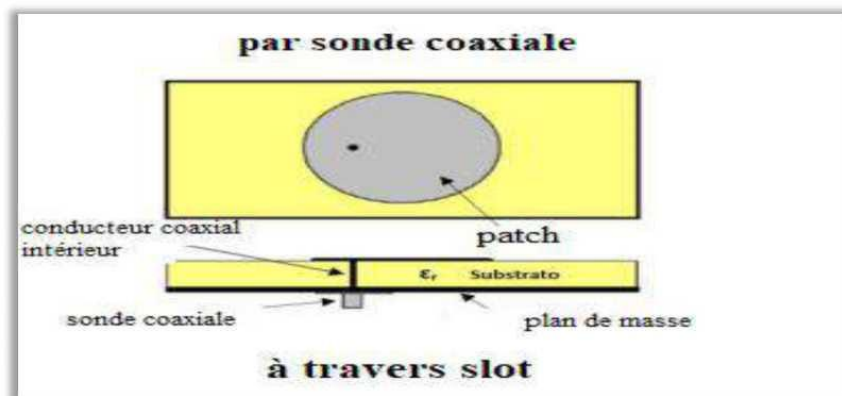


Figure I-8: Antenne imprimée alimentée par sonde coaxiale

L'excitation par câble coaxial présente à la fois des avantages et des inconvénients, en fonction des besoins spécifiques de l'application. Voici une liste des avantages et des inconvénients de cette méthode d'excitation :

#### A) Avantage :

- **Bonne isolation électrique** : Le câble coaxial offre une excellente isolation électrique, ce qui permet de réduire les interférences électromagnétiques et d'améliorer la pureté du signal.
- **Large bande passante** : Les câbles coaxiaux peuvent prendre en charge une large bande passante, ce qui les rend adaptés à des fréquences élevées et à des applications à large spectre.
- **Faibles pertes de propagation** : Comparés à certaines autres méthodes d'excitation, les câbles coaxiaux présentent généralement de faibles pertes de propagation, ce qui permet de minimiser les pertes de signal.

- **Facilité d'installation** : Les câbles coaxiaux sont faciles à installer et à connecter aux antennes, ce qui permet un déploiement rapide et efficace.

#### B) Inconvénients :

- **Encombrement** : Les câbles coaxiaux peuvent être encombrants, en particulier à des fréquences élevées, ce qui peut poser des problèmes d'intégration dans des espaces restreints.
- **Pertes de signal à haute fréquence** : À des fréquences très élevées, les câbles coaxiaux peuvent présenter des pertes de signal significatives, ce qui peut limiter leur utilisation dans certaines applications.
- **Coût** : Les câbles coaxiaux de haute qualité peuvent être coûteux, en particulier pour les longueurs importantes.
- **Sensibilité aux interférences mécaniques** : Les câbles coaxiaux sont sensibles aux interférences mécaniques, ce qui signifie qu'ils peuvent être sujets à des problèmes de connectivité en cas de vibrations ou de mouvements.

#### I.3.3.3 Excitation par couplage électromagnétique :

Ce mode d'alimentation est réalisé en établissant un couplage électromagnétique entre une ligne microstrip et l'élément rayonnant (voir Figure I.9).

L'antenne est composée de deux substrats diélectriques, avec la ligne d'alimentation placée entre eux. L'élément rayonnant est imprimé sur le substrat supérieur (voir Figure I.9). L'excitation est réalisée par le biais d'un couplage électromagnétique. Bien que cette technique permette d'améliorer la bande passante, elle peut s'avérer complexe à mettre en œuvre.

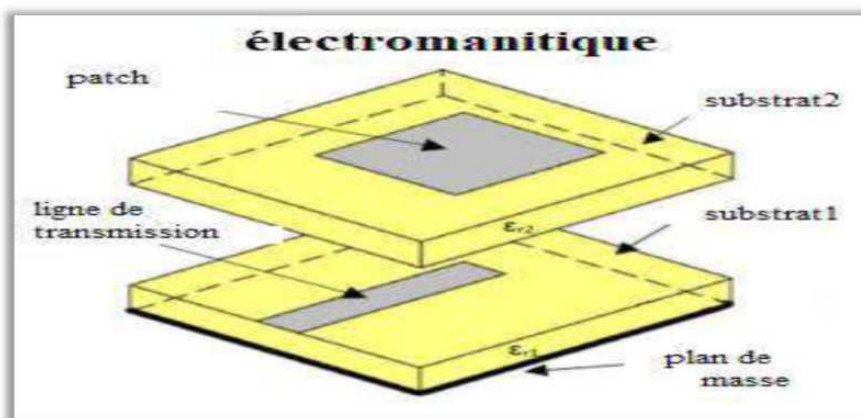


Figure I-9:Excitation par couplage électromagnétique

L'excitation par couplage électromagnétique présente des avantages et des inconvénients, en fonction de l'application spécifique et des besoins de conception. Voici une liste des avantages et des inconvénients de cette méthode d'excitation :

**A) Avantage :**

- **Large bande passante :** Le couplage électromagnétique peut permettre une bande passante plus large par rapport à certaines autres méthodes d'excitation, ce qui est avantageux pour les applications nécessitant une large gamme de fréquences.
- **Isolation électrique :** Comme il n'y a pas de connexion électrique directe, le couplage électromagnétique offre une bonne isolation électrique entre la ligne d'alimentation et l'élément rayonnant, réduisant ainsi le risque d'interférences électromagnétiques.
- **Adaptation d'impédance :** Il est généralement possible de concevoir le couplage électromagnétique pour obtenir une adaptation d'impédance précise entre la ligne d'alimentation et l'antenne.

**B) Inconvénients :**

- **Complexité de conception :** Le couplage électromagnétique peut être plus complexe à concevoir et à optimiser par rapport à certaines autres méthodes d'excitation, ce qui peut nécessiter des compétences d'ingénierie avancées.
- **Sensibilité à la proximité :** Le couplage électromagnétique peut être sensible à la proximité d'autres composants métalliques ou d'objets étrangers, ce qui peut entraîner des variations imprévues des performances de l'antenne.
- **Perte de signal :** Dans certains cas, le couplage électromagnétique peut entraîner des pertes de signal, en particulier à des fréquences élevées, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines applications sensibles aux pertes de signal.
- **Difficulté de mise en œuvre :** La mise en œuvre du couplage électromagnétique peut être plus délicate et nécessiter des ajustements minutieux pour obtenir les performances souhaitées.

En résumé, l'excitation par couplage électromagnétique offre des avantages tels qu'une large bande passante, une bonne isolation électrique et une adaptation d'impédance précise, mais elle peut être plus complexe à concevoir et à mettre en œuvre, et elle peut être sensible à la proximité d'autres composants métalliques. Le choix de cette méthode dépendra des besoins spécifiques de l'application et des compétences disponibles en ingénierie.

## I.4 La technologie MIMO

### I.4.1 Définition :

La technologie MIMO représente une solution prometteuse pour améliorer l'utilisation du spectre en transmettant des données via un réseau à multiples antennes à la fois en émission et en réception. Cette approche offre non seulement des débits élevés, mais également une qualité de transmission remarquable grâce à la diversité spatiale.

MIMO, acronyme de "Multiple Inputs and Multiple Outputs", est une technologie sans fil qui exploite simultanément plusieurs émetteurs et récepteurs pour acheminer d'importantes quantités de données. Au cours de ce chapitre, nous explorerons de manière approfondie le système MIMO, ses différentes catégories, leurs capacités respectives, les avantages qu'elles confèrent, les avancées récentes ainsi que les domaines d'application de cette technologie.

### I.4.2 Développement et l'histoire du MIMO :

La technologie MIMO a connu un développement sur de nombreuses années. Non seulement les principes fondamentaux du MIMO ont été élaborés, mais également de nouvelles avancées technologiques ont été nécessaires pour permettre la mise en œuvre complète du MIMO. De nouveaux niveaux de traitement ont été requis pour exploiter certains des avantages du multiplexage spatial et pour maximiser les bénéfices de la diversité spatiale.

Jusqu'aux années 1990, la diversité spatiale était souvent limitée à des systèmes qui alternaient entre deux antennes ou combinaient des signaux pour obtenir le meilleur signal possible. Des techniques de commutation de paquets de diverses sortes ont également été utilisées, mais compte tenu des niveaux de traitement nécessaires et des ressources de traitement disponibles à l'époque, ces systèmes étaient relativement restreints dans leurs capacités.

Les premières recherches sur les systèmes MIMO se sont principalement concentrées sur l'exploitation de la diversité spatiale de base. Dans ce contexte, le MIMO était utilisé pour atténuer les effets néfastes de la propagation multi trajectoire. Cependant, ce n'était que le début, car les systèmes MIMO ont ensuite exploité la propagation multi patch à leur avantage, en convertissant efficacement ces trajets de signal supplémentaires en canaux supplémentaires pour la transmission des données [8].

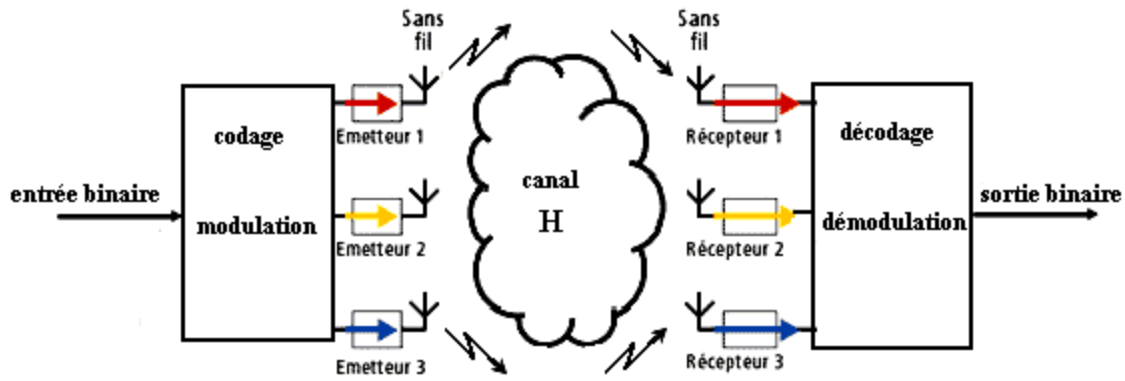


Figure I-10: Schéma d'un système de transmission sans fil MIMO.

#### I.4.3 Notion de diversité :

Afin de prévenir les effets de la propagation multipath et d'améliorer la qualité de la transmission sans fil, les technologies de diversité sont largement adoptées, sans toutefois compromettre la capacité de transmission ni sacrifier la largeur de bande. Une approche intéressante consiste à envoyer le même signal sur des canaux indépendants, ce qui renforce la récupération du signal émis lors de la réception. À mesure que le nombre de canaux indépendants augmente, la probabilité d'un affaiblissement profond diminue pour l'ensemble des canaux indépendants, ce concept étant au cœur de la notion de diversité [9].

En d'autres termes, la diversité implique la transmission de plusieurs copies identiques d'informations sur des canaux distincts pour contrer les effets du fading. L'ordre de diversité, noté  $D$ , se définit comme le nombre de répliques indépendantes à disposition du récepteur. À mesure que  $D$  augmente, la probabilité d'erreur diminue de manière exponentielle à des rapports signal/bruit élevés. Plusieurs techniques de diversité sont mises en œuvre pour atteindre les performances requises, parmi lesquelles figurent :

#### I.4.4 Explication générale de la technique MIMO :

Le MIMO est une technologie sans fil qui tire parti de plusieurs émetteurs et récepteurs pour transmettre simultanément une plus grande quantité de données. Cette technologie exploite un phénomène des ondes radio appelé "trajectoires multiples", où les signaux rebondissent sur diverses surfaces, tels que les murs, les plafonds et autres objets, atteignant l'antenne de réception à plusieurs reprises, à des angles différents et légèrement décalés dans le temps.

Les systèmes MIMO occupent une place centrale dans le développement visant à accroître les débits des communications sans fil. Leur caractéristique distinctive réside dans l'utilisation

simultanée de multiples antennes, à la fois en émission et en réception. Ces systèmes offrent non seulement des améliorations significatives des performances des appareils, mais ils permettent également d'atteindre des efficacités spectrales élevées tout en luttant efficacement contre les phénomènes d'affaiblissement du signal. L'idée fondamentale est d'exploiter la dimension spatiale du canal et de capitaliser sur les trajets multiples au lieu de les supprimer [11].

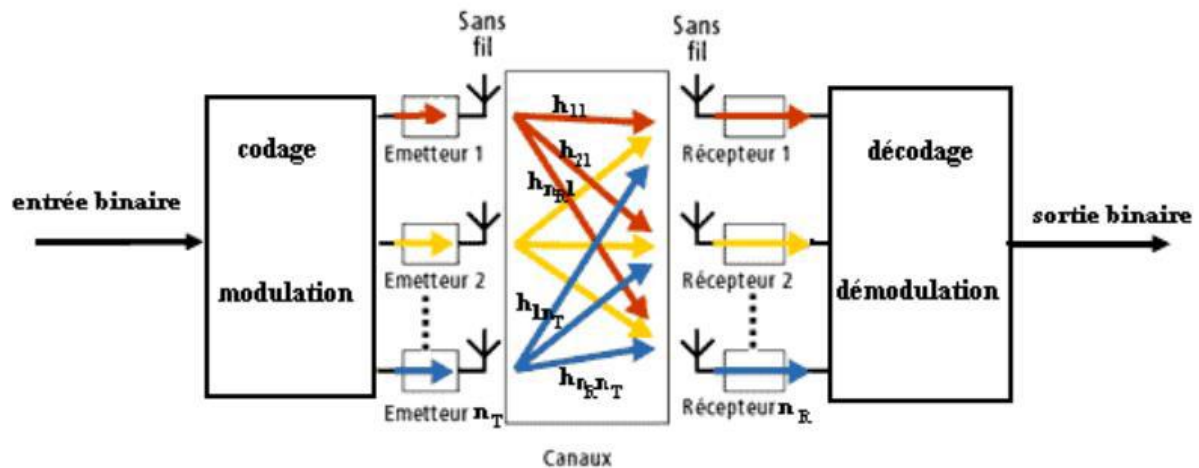


Figure I-11: Principe de système MIMO

La technologie MIMO capitalise sur le comportement multi-trajets en intégrant plusieurs émetteurs-récepteurs "intelligents" qui apportent une dimension spatiale supplémentaire, engendrant ainsi des améliorations notables en performances et en autonomie. Avec MIMO, plusieurs antennes peuvent simultanément transmettre et recevoir plusieurs flux spatiaux. Cette technologie confère une intelligence accrue aux antennes, leur permettant de fusionner habilement les flux de données provenant de divers chemins et moments, ce qui amplifie efficacement la puissance de réception du signal. Les antennes intelligentes exploitent la diversité spatiale en tirant parti des antennes redondantes. Si le nombre d'antennes excède celui des flux spatiaux, des antennes supplémentaires peuvent être utilisées pour accroître la diversité au niveau du récepteur, ce qui étend la portée du système. Il existe différents types de transmission MIMO, notamment MISO, SIMO et SISO (comme illustré dans la Figure 1.11) [12].

### I.4.5 Les différents types de codage MIMO :

Dans un système MIMO, il existe plusieurs méthodes pour effectuer le codage des signaux :

#### I.4.5.1 Le multiplexage par répartition de fréquence orthogonale (OFDM) :

La technique de multiplexage OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) implique de répartir un signal numérique que l'on souhaite transmettre sur un grand nombre de porteuses, comme si l'on combinait ce signal sur des émetteurs indépendants à des fréquences différentes. Pour maximiser la quantité d'informations transmises sur une bande de fréquences donnée, l'OFDM utilise des porteuses qui sont orthogonales les unes par rapport aux autres, c'est-à-dire qu'elles sont disposées le plus près possible les unes des autres en fréquence, tout en évitant les interférences mutuelles. Bien que les signaux des différentes porteuses se superposent, leur orthogonalité garantit qu'ils ne se perturbent pas mutuellement. Ainsi, dans un environnement soumis à des effets de multi-trajets où certaines fréquences peuvent être altérées en raison de perturbations, le système est toujours capable de récupérer les données perdues en utilisant les fréquences porteuses qui n'ont pas été affectées.[13]

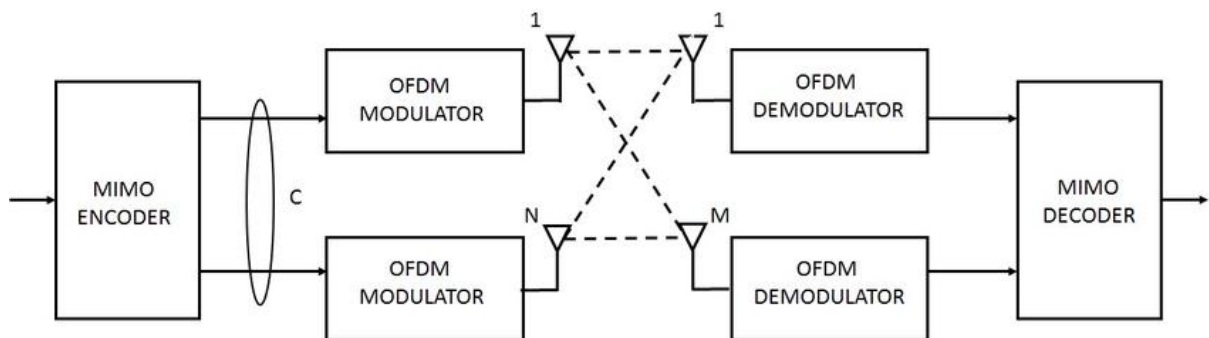


Figure I-12 : Model du système MIMO-OFDM

#### I.4.5.2 Le multiplexage par division spatiale (SDM)

La méthode de multiplexage spatial (SDM, pour Spatial Division Multiplexing) consiste à multiplexer simultanément plusieurs flux de données indépendants dans un canal spectral. Le multiplexage spatial peut considérablement améliorer le débit, car il permet de traiter un plus grand nombre de données spatiales distinctes. Chaque flux spatial requiert sa propre paire d'antennes d'émission et de réception à chaque extrémité de la liaison radio. Il est important de souligner que chaque antenne du système MIMO nécessite sa propre chaîne de radiofréquences (RF) ainsi qu'un convertisseur analogique-numérique distinct. Les configurations impliquant plus de deux chaînes d'antennes RF doivent être soigneusement

conçues pour maintenir des coûts raisonnables tout en répondant aux exigences de performance. [14]

### I.4.5.3 Le codage spatio-temporel par bloc (STBC)

La technique STBC (Space-Time Bloc Code), tout comme le SDM, permet d'acheminer des signaux distincts via chaque antenne. Le principe sous-jacent au STBC réside dans l'introduction d'une redondance d'informations entre les deux antennes. Le canal STBC est constitué de  $M \times N$  sous-canaux, chacun d'entre eux étant un canal à évanescence indépendant. Cette caractéristique du STBC accroît la diversité du canal de transmission, renforçant ainsi la robustesse du récepteur. Cette approche présente un attrait considérable, car elle n'exige pas la connaissance de l'état du canal (CSI), même si cela peut réduire la capacité de transmission des données [15]. Le gain de diversité qui en découle améliore la fiabilité des connexions sans fil en présence d'évanouissements, rehaussant ainsi la qualité de la transmission. Il est à noter que ce type de codage n'accroît pas la capacité de transmission de manière linéaire avec le nombre d'éléments utilisés. Par conséquent, pour améliorer à la fois la capacité et la qualité, un système MIMO doit être mis en œuvre en utilisant les deux types de codage, à savoir le SDM et le STBC. . [16]

## I.4.6 Types de MIMO :

### I.4.6.1 System SISO (Single Input Single Output)

Un système SISO se caractérise par la présence d'une unique entrée et d'une unique sortie. Ces systèmes, représentés dans la Figure 13, sont les plus élémentaires et sont également désignés comme des systèmes mono-variables [17-18].

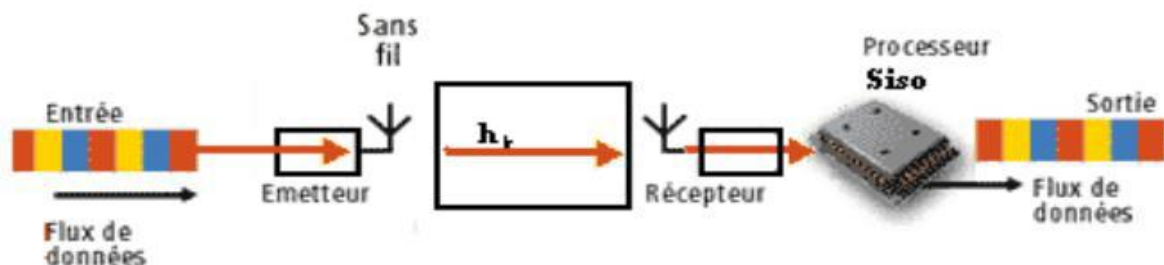


Figure I-13 : Système SISO

La capacité du canal SISO est donner par :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N_0} W \right) \text{ [bits / S]} \quad (\text{I.6})$$

Où :

P : la puissance du signal utile en Watt,

**N<sub>0</sub>**: la densité spectrale de puissance du bruit calculé en W/Hz,

W : la bande passante donnée en Hz.

En normalisant la capacité par la bande utile W, on obtient :

$$C = (1 + \rho) \text{ [bit/s]} \quad (\text{I.7})$$

Avec  $\rho$  est le rapport signal sur bruit (SNR).

Les avantages et les inconvénients d'un système SISO (Single Input, Single Output) peuvent être résumés comme suit :

#### A) Avantages du système SISO :

- **Simplicité** : Les systèmes SISO sont les plus simples à concevoir, à mettre en œuvre et à entretenir en raison de leur configuration à une seule entrée et à une seule sortie.
- **Coût réduit** : En raison de leur simplicité, les systèmes SISO sont généralement moins coûteux à déployer et à maintenir par rapport aux systèmes plus complexes.
- **Utilisation efficace de la bande passante** : Dans des cas où la largeur de bande est limitée, un système SISO peut être suffisamment efficace pour répondre aux besoins de communication.

#### B) Inconvénients du système SISO :

- **Limitations en termes de capacité** : Les systèmes SISO ont des limitations de capacité, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas transmettre ou recevoir plusieurs flux de données simultanément, limitant ainsi le débit global.
- **Vulnérabilité aux interférences** : Les systèmes SISO sont plus sensibles aux interférences, ce qui peut entraîner une dégradation de la qualité de la communication en présence de bruit ou de perturbations.
- **Portée limitée** : Les systèmes SISO ont généralement une portée de transmission limitée, ce qui peut être un inconvénient dans les applications nécessitant une couverture étendue.

- **Faible fiabilité** : En cas de défaillance de l'antenne unique, la communication peut être interrompue, ce qui peut être problématique dans les systèmes nécessitant une haute disponibilité.

En résumé, les systèmes SISO sont simples et économiques, mais ils présentent des limitations en termes de capacité, de résistance aux interférences et de portée. Ils sont adaptés à des applications simples, mais pour des besoins de communication plus complexes, des systèmes MIMO (Multiple Input, Multiple Output) ou d'autres configurations plus avancées peuvent être préférables.

#### I.4.6.2 Système MISO (Multiple Input Single Output)

Il s'agit d'une technique de diversité spatiale en émission, où plusieurs antennes émettent des signaux qui sont captés par une seule antenne en réception [17-18].

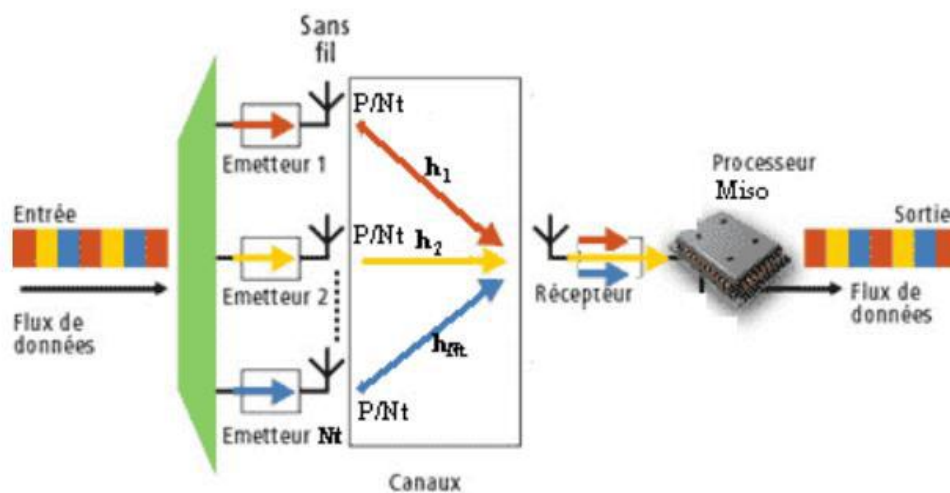


Figure I-14 : Système MISO

Dans ce mode de transmission, une superposition du signal transmis simultanément par les  $N_t$  antennes émettrices est reçue. Chaque antenne émet le même symbole d'énergie ( $ES/N_t$ ). C'est-à-dire que la puissance émise est divisée sur le nombre d'antenne telle que :

$$P = \sum_{i=1}^{N_t} P_i = 1 \quad (I.8)$$

Avec  $P_i$  est la puissance émise sur chaque antenne. Si cette puissance est égale sur toutes les antennes, alors on dira que :

$$P = Nt.Pi. \quad (I.9)$$

La capacité du canal MISO :

$$C = W.\log_2(1 + Nt\frac{P_i}{N_0}W) = W.\log_2(1 + \frac{P}{N_0}W) \text{ [bits / S]} \quad (I.10)$$

Un système MISO (Multiple Input, Single Output) comporte plusieurs avantages et inconvénients :

#### A) Avantages du système MISO :

- **Diversité spatiale** : Le principal avantage du MISO réside dans sa capacité à exploiter la diversité spatiale en utilisant plusieurs antennes d'émission, ce qui permet de réduire les effets de l'évanouissement du canal et d'améliorer la qualité de la réception.
- **Amélioration du rapport signal/bruit** : Les signaux transmis par différentes antennes peuvent être combinés pour augmenter le rapport signal/bruit, ce qui se traduit par une meilleure qualité de réception et une plus grande portée de communication.
- **Augmentation de la capacité** : Bien que le MISO ne puisse pas augmenter la capacité de manière linéaire par rapport au nombre d'antennes d'émission, il peut tout de même permettre une augmentation significative de la capacité par rapport à un système SISO.
- **Résistance accrue aux interférences** : Les systèmes MISO sont souvent plus résistants aux interférences, car ils peuvent exploiter la diversité spatiale pour atténuer les effets des signaux parasites.

#### B) Inconvénients du système MISO :

- **Complexité** : Les systèmes MISO sont plus complexes à concevoir et à mettre en œuvre que les systèmes SISO en raison du besoin de gérer plusieurs antennes d'émission.
- **Coût** : La mise en place de plusieurs antennes d'émission implique un coût supplémentaire, ce qui peut rendre les systèmes MISO plus onéreux à déployer.
- **Sensibilité à la conception de l'antenne** : La performance du MISO dépend en grande partie de la conception et de la configuration correcte des antennes, ce qui peut être un défi.
- **Nécessite des canaux indépendants** : Pour obtenir des avantages significatifs en termes de diversité spatiale, il est nécessaire que les canaux entre les antennes

d'émission et la seule antenne de réception soient relativement indépendants. Dans certains environnements, cela peut ne pas être réalisable.

En résumé, le MISO offre une amélioration de la qualité de réception, une augmentation de la capacité et une résistance accrue aux interférences, mais il présente une complexité et un coût plus élevés par rapport aux systèmes SISO. Le choix entre un système MISO et d'autres configurations dépend des besoins spécifiques de la communication et des contraintes budgétaires.

#### I.4.6.3 Système SIMO (Single Input Multiple Output) :

Il s'agit d'une technique qui fait appel à plusieurs antennes en réception afin de contrer les effets de l'évanouissement liés au canal [17-18]. Le signal reçu est combiné, et le rapport signal/bruit total est la somme des rapports signal/bruit de chacune des antennes de réception (comme illustré dans la Figure 1.15).

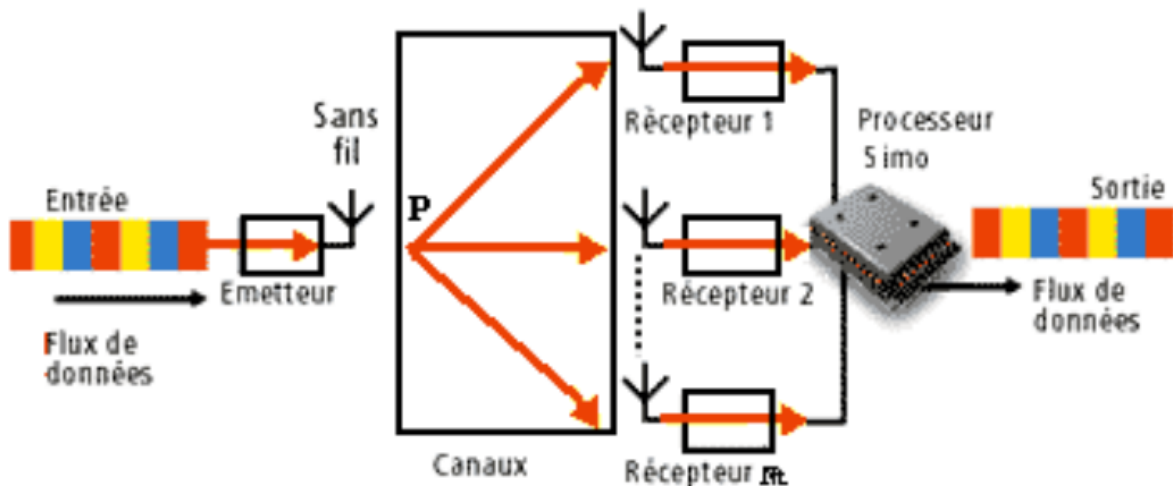


Figure I-15 : Système SIMO

La capacité du canal SIMO :

$$C = W \cdot \log_2 \left( 1 + N_R^2 \frac{P}{N_0} W \right) \text{ [bit/s]} \quad (\text{I.11})$$

$N_r$  : le nombre d'antenne réceptrice.

En normalisant la capacité par la bande utile  $W$ , nous obtenons :

$$C = \log_2 (1 + N_R^2 \rho) \text{ [bits / S]} \quad (\text{I.12})$$

Avec  $\rho$  est le rapport signal sur bruit.

Un système SIMO (Single Input, Multiple Output) comporte plusieurs avantages et inconvénients :

#### A) Avantages du système SIMO :

- **Diversité spatiale** : Le principal avantage du SIMO réside dans sa capacité à exploiter la diversité spatiale en utilisant plusieurs antennes de réception pour lutter contre les effets de l'évanouissement du canal. Cela améliore la qualité de la réception et la fiabilité de la communication.
- **Résistance accrue aux interférences** : Les systèmes SIMO peuvent atténuer les interférences en utilisant la diversité spatiale pour extraire le signal souhaité des signaux parasites.
- **Utilisation efficace de l'espace** : Le SIMO ne nécessite qu'une seule antenne d'émission, ce qui peut réduire les coûts de conception et de déploiement par rapport aux systèmes MIMO plus complexes.
- **Amélioration du rapport signal/bruit** : L'utilisation de plusieurs antennes de réception peut augmenter le rapport signal/bruit, ce qui se traduit par une meilleure qualité de réception.

#### B) Inconvénients du système SIMO :

- **Limitation de la capacité** : Le SIMO ne permet pas d'augmenter la capacité de manière significative par rapport au SISO, car il ne peut pas transmettre plusieurs flux de données simultanément.
- **Dépendance à l'égard du nombre d'antennes de réception** : La performance du SIMO dépend du nombre d'antennes de réception utilisées. Pour obtenir des avantages significatifs, il peut être nécessaire d'utiliser plusieurs antennes de réception, ce qui peut augmenter les coûts.
- **Sensibilité à la configuration des antennes de réception** : La performance du SIMO dépend de la disposition et de la configuration correcte des antennes de réception, ce qui peut nécessiter une conception soignée.

En résumé, le SIMO offre une amélioration de la qualité de réception, une résistance accrue aux interférences et une utilisation efficace de l'espace, mais il présente des limitations en

termes de capacité de transmission. Le choix entre un système SIMO et d'autres configurations dépend des besoins spécifiques de la communication et des contraintes budgétaires.

#### I.4.6.4 Système MIMO (Multiple Input Multiple Output) :

La technologie MIMO offre la possibilité d'accroître de manière linéaire le débit en fonction du nombre d'antennes en réception, tout en contrant les effets de l'évanouissement du canal. De cette manière, elle permet de réduire la probabilité d'évanouissement et d'affaiblissement du signal. La distinction entre un système MISO et un système MIMO réside dans le fait que le MISO envoie des paquets identiques aux antennes émettant à la même fréquence, tandis que le MIMO envoie des paquets différents aux antennes émettant à la même fréquence (comme illustré dans la Figure 1.16) [17-18].

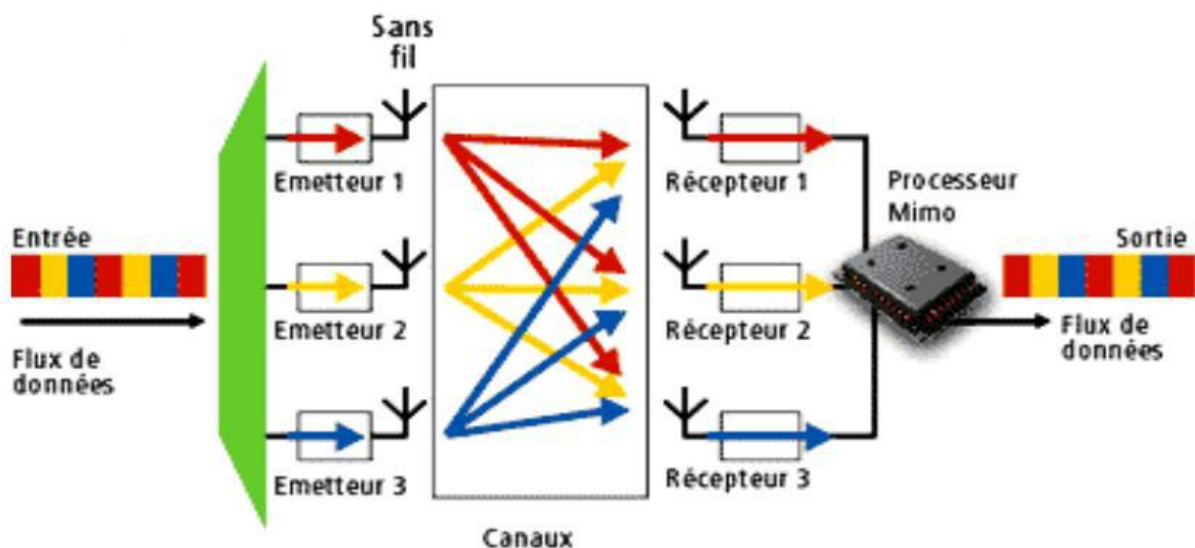


Figure I-16 : Système MIMO

La technologie MIMO (Multiple Input, Multiple Output) présente plusieurs avantages et inconvénients :

##### A) Avantages de la technologie MIMO :

- **Amélioration du débit** : MIMO permet d'augmenter considérablement le débit des communications sans fil en exploitant plusieurs antennes en émission et en réception pour transmettre simultanément plusieurs flux de données.

- **Diversité spatiale** : MIMO utilise la diversité spatiale pour atténuer les effets de l'évanouissement du canal, ce qui améliore la qualité de la réception et la fiabilité de la communication.
- **Efficacité spectrale** : En permettant la transmission de plusieurs flux de données sur le même canal, MIMO utilise l'espace de manière plus efficace, ce qui augmente l'efficacité spectrale.
- **Portée accrue** : En améliorant le rapport signal/bruit, MIMO peut étendre la portée des communications sans fil, ce qui est bénéfique dans les environnements à couverture étendue.

#### B) Inconvénients de la technologie MIMO :

- **Complexité** : Les systèmes MIMO sont plus complexes à concevoir et à mettre en œuvre que les systèmes SISO (Single Input, Single Output) ou SIMO (Single Input, Multiple Output), ce qui peut entraîner des coûts plus élevés.
- **Sensibilité à la configuration** : La performance de MIMO dépend de la disposition et de la configuration correcte des antennes, ce qui peut nécessiter une conception soignée.
- **Besoin de canaux indépendants** : Pour obtenir des avantages significatifs en termes de diversité spatiale, il est nécessaire que les canaux entre les antennes soient relativement indépendants, ce qui peut ne pas être réalisable dans tous les environnements.
- **Consommation d'énergie** : Les systèmes MIMO peuvent avoir une consommation d'énergie plus élevée en raison de l'utilisation de plusieurs antennes en émission et en réception.

En résumé, la technologie MIMO offre des avantages significatifs en termes de débit, de diversité spatiale et d'efficacité spectrale, mais elle présente également des défis liés à la complexité, à la configuration et à la dépendance à l'égard de canaux indépendants. Le choix d'adopter MIMO dépend des besoins spécifiques de la communication et des contraintes budgétaires.

#### I.4.7 Domaines d'utilisation de la technologie MIMO :

Les systèmes MIMO sont l'un des principaux axes de développement pour augmenter les débits des communications sans fil.

MIMO est également prévu pour être utilisé dans la radiotéléphonie mobile des normes récentes telles que : 3GPP et 3GPP2. En 3GPP, les normes : accès haute vitesse par paquets plus (HSPA+) et Long Term Evolution (LTE) prennent en compte le MIMO.

Par ailleurs, à soutenir pleinement les environnements cellulaires, y compris les consortiums de recherche MIMO IST-MASCOT proposons de développer des techniques avancées MIMO, par exemple, MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO). [19]

Les systèmes : HiperLAN/2, WiFi et les systèmes de la 4ème génération tels que l’LTE et le WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) utilisent la technologie MIMO-OFDM, afin d’augmenter le débit de transmission et améliorer sa qualité. [20]

#### **I.4.7.1 La technologie MIMO dans le système WiMAX :**

Le terme "WiMAX" désigne la technologie conforme à la norme IEEE 802.16, qui concerne à la fois l'interface d'air pour la couche physique (PHY) et la couche de contrôle d'accès media (MAC). En plus de supporter diverses largeurs de bande de canal et de mettre en œuvre une modulation et un codage adaptatifs, WiMAX a également vu l'adoption significative de la technologie MIMO. L'intégration de MIMO améliore la qualité de réception, permet une extension plus poussée et augmente le débit de transmission global. La mise en œuvre de MIMO confère également à WiMAX une efficacité spectrale notablement améliorée [34 :21].

#### **I.4.7.2 La technologie MIMO dans le système WiFi :**

La norme 802.11n a été mise à disposition à partir du 11 septembre 2009, offrant un débit théorique de 300 Mbit/s (avec un débit réel d'environ 100 Mbit/s dans un rayon de 100 mètres), grâce à l'incorporation des technologies MIMO et OFDM [22].

#### **I.4.8 MIMO massif :**

Les réseaux MIMO classiques sont habituellement équipés de deux à quatre antennes pour la transmission et le même nombre pour la réception. En revanche, le MIMO massif est un système MIMO qui se distingue par un nombre exceptionnellement élevé d'antennes [23]. Une station de base MIMO massif peut exploiter plusieurs dizaines, voire même plusieurs centaines d'antennes pour servir simultanément de nombreux utilisateurs.

En général, le terme "MIMO massif" est utilisé pour décrire un système d'antennes qui combine à la fois la formation de faisceaux (beamforming) et le multiplexage spatial. Bien

que le MIMO massif soit couramment associé aux stations de base, on observe également une augmentation du nombre d'antennes au niveau des terminaux pour mettre en œuvre les technologies MIMO.

Les systèmes de communication 5G font largement usage de la technique de MIMO massif pour améliorer l'efficacité spectrale du système. Les systèmes MIMO massifs sont particulièrement efficaces pour contrer les effets de l'évanouissement sévère des signaux à ondes millimétriques et pour supprimer les interférences dans les réseaux multicouches et densément peuplés.

## **I.5 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre nous a permis d'explorer les antennes, elles jouent un rôle crucial dans les systèmes de communication sans fil en permettant la transmission et la réception des signaux électromagnétiques. Leurs performances dépendent de divers facteurs, notamment la conception, la fréquence de fonctionnement, l'impédance et l'adaptation, en mettant en lumière les caractéristiques essentielles des antennes patchs. Elles sont couramment utilisées dans les applications de communication sans fil en raison de leur faible encombrement, de leur facilité de fabrication et de leurs performances acceptables. Nous avons discuté des différentes configurations d'antennes patch, des matériaux diélectriques utilisés et des techniques d'adaptation pour optimiser leurs performances, et en introduisant les concepts fondamentaux des antennes MIMO d'où sont une technologie avancée qui exploite la diversité spatiale des antennes pour améliorer la capacité et la fiabilité des systèmes sans fils.

## Bibliographies

- [1] David M. Pozar, Daniel H. Schaubert, "Microstrip Antennas: The Analysis and Design of Microstrip Antennas and Arrays", 2002.
- [2] Chouti Leila, « Contribution à l'étude des antennes imprimées rectangulaires Double et multi bandes tenant compte de l'effet de couplage », Mémoire de Magister En électronique, option : Micro-ondes; Université Mentouri de Constantine, (Janvier 2009)
- [3] Pendry, J. B., A. J. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, 2075–2084, 1999.
- [4] P. Mythili, A. Das, «Simple approach to determine resonant frequencies of Crostrip antennas», IEE Proc.-Microw. Antennas Propag . Vol. 145, No. 2, April 1998.]
- [5] L. Merad, « Modélisation et optimisation de réseaux d'antennes imprimées par Les réseaux de neurones et les méthodes stochastiques», Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, juin 2005.
- [6] James, J. R, and P. S. Hall (Eds), "Handbook of Microstrip Antennas", Peter Peregrinus , London .UK ,1989 .
- [7] Pozar, D. M, "Microstrip Antennas", Proc.IEEE, Vol. 80, pp. 79-91, 1992.]
- [8] <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/what-is-mimo-multiple-input-multiple-output-wireless-technology.php>
- [9] MAHI Sara « Étude et implémentation d'algorithmes innovants de pré codage MIMO associés aux codes LDP». Année 2018
- [10] A thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy In Electrical and Computer Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. MIMO Systems with Multifunctional Reconfigurable Antennas Année (2019)
- [11] D. karakolah. Conception de prototypage d'un récepteur itératif pour les systèmes de transmission MIMO avec pré-codage linéaire. Thèse de doctorat, université Bretagne-sud, France, 2009.
- [12] Staudy Paper on Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) Technologie.
- [13] <http://fr.wikipedia.org/wiki/OFDM>
- [14] [www.afjv.fr/press0512/051219\\_standards\\_sans\\_fil\\_wifi.htm](http://www.afjv.fr/press0512/051219_standards_sans_fil_wifi.htm)

- [15] Collin L., “Optimisation de systèmes multi-antennes basée sur la distance minimale”, thèse de doctorat, 17 décembre 2002
- [16] Plicanic V., “Antenna Diversity Studies and Evaluation” Master of science Thesis, Lund University Sweden May 2004
- [17] Ludovic COLLIN « Optimisation de systèmes multi antennes basée sur la distance minimale », l’Université de Bretagne Occidentale, 17 décembre 2002
- [18] Pierre GRUYER, Simon PAILLARD, « Modélisation d'un modulateur et démodulateur OFDM », Université de Bretagne 12 décembre 2005.
- [19] « MIMO - Wikipedia, the free encyclopedia » <http://en.wikipedia.org/wiki/mimo>
- [20] ZERROUKI Hadj « Application de la technologie MIMO dans les réseaux Wi-Fi » Thèse de Magister en Télécommunications, Université de Tlemcen, juin 2006
- [21] « WiMAX\_MIMO » [www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX\\_MIMO](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX_MIMO)
- [22] K. Daci et W. Dou, «*Etude de massive MIMO pour 5G*», EL-Oued, 2019.
- [23] « WiMAX\_MIMO » [www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX\\_MIMO](http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/fr/WiMAX_MIMO).
- [24] Abboud, Ahmad. Interference mitigation in 5G mobile networks: Uplink pilot contamination in TDD massive MIMO scheme. Diss. Limoges, 2017.

## **Chapitre II: LES METAMATERIAUX**

## II.1 Introduction

Depuis une décennie, on constate une augmentation notable de l'activité de recherche consacrée à des matériaux dont les propriétés ne se trouvent pas naturellement nommé métamatériaux (MMT). C'est un domaine de recherche important en raison de leurs caractéristiques uniques, qui sont prometteuses pour répondre aux besoins des applications microondes et optiques modernes. Les métamatériaux se réfèrent à des structures composites artificielles, qui présentent des propriétés inhabituelles, parfois surprenantes, telles qu'un indice de réfraction négatif.

## II.2 Définition

D'un point de vue sémantique, le préfixe "méta" dérive du grec et signifie "au-delà de". Par conséquent, le terme "méta matériau" désigne une catégorie de matériaux dont les caractéristiques vont au-delà de celles des matériaux naturels. Plus précisément, cela fait référence à des substances dont la structure interne interagit de manière particulière avec une onde incidente, qu'elle soit acoustique ou électromagnétique, créant ainsi des propriétés macroscopiques "effectives" inhabituelles, voire inexistantes dans les matériaux naturels.

Bien que la nature produise déjà certains matériaux ayant une permittivité ( $\epsilon$ ) négative, tels que les plasmas et les métaux, il est important de noter que la perméabilité ( $\mu$ ) négative ne se manifeste que dans des structures artificielles.

Pour mieux visualiser cette notion, on peut envisager de représenter l'ensemble des matériaux dans un diagramme qui inclut toutes les valeurs possibles (réelles) de  $\mu$  et  $\epsilon$  comme indiqué dans la figure II.1. À des fréquences supérieures à quelques dizaines de gigahertz, les matériaux naturels ont généralement une perméabilité ( $\mu$ ) très proche de 1, ce qui les place autour de la ligne  $\mu = 1$ . On désigne comme "diélectriques" les matériaux ayant une permittivité ( $\epsilon$ ) positive et comme "métaux" ceux ayant une permittivité négative (en-dessous d'une certaine fréquence de seuil plasma). En examinant ce graphique, il devient évident que les matériaux naturels ne couvrent qu'une petite portion des valeurs possibles de  $\epsilon$  et  $\mu$ . Par conséquent, l'objectif de métamatériaux est, en principe du moins, d'explorer les propriétés des matériaux occupant la majeure partie du plan ( $\mu, \epsilon$ ). [1]

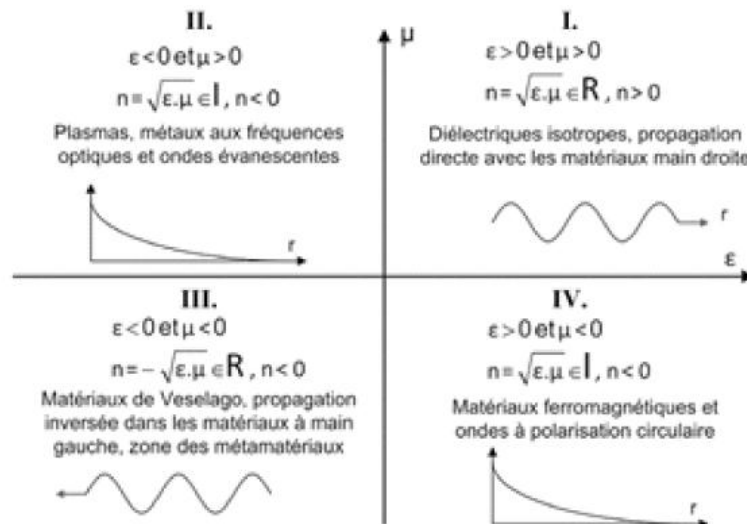


Figure II-1 :Classement des matériaux en fonction du signe de leur permittivité et de leur Perméabilité

### II.3 Terminologie :

Il existe plusieurs termes synonymes dans la littérature pour désigner les métamatériaux, notamment ceux appelés "Matériaux main gauche" (left-handed materials). Ces termes se déclinent comme suit :

- ❖ "Matériaux main gauche" (left-handed materials) est un terme introduit par Veselago [2], mettant en avant la propriété fondamentale des métamatériaux, à savoir l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe.
- ❖ "Matériaux doublement négatif" (double-negative materials) désigne des matériaux ayant à la fois une permittivité et une perméabilité négatives.
- ❖ "Matériaux à indice de réfraction négatif" (negative refractive index materials) est un terme qui englobe les matériaux en deux dimensions (2D) et en trois dimensions (3D). Cependant, il ne peut pas être utilisé pour décrire les matériaux unidimensionnels (1D) car la notion d'angle de réfraction n'a pas de sens dans ce contexte.
- ❖ "Matériaux à onde réfléchie" (back Ward wave materials) met en évidence une autre caractéristique des métamatériaux, mais il ne fournit pas une définition précise des métamatériaux, car les ondes réfléchies peuvent également se produire dans des structures classiques.

Afin d'introduire les métamatériaux, il est nécessaire de faire une nouvelle classification des matériaux, basée sur les différentes valeurs des deux paramètres  $\epsilon$  et  $\mu$ . Ainsi, on peut classer les milieux isotropes en fonction du signe de ces paramètres.

### II.3.1 Les Matériaux doublement positifs (DPS) :

Les "Matériaux doublement positifs" (DPS) sont une catégorie de matériaux qui se caractérisent par des valeurs positives à la fois de leur permittivité ( $\epsilon$ ) et de leur perméabilité ( $\mu$ ). Ces deux propriétés décrivent la manière dont le matériau interagit avec les champs électriques et magnétiques, respectivement.

#### II.3.1.1 Caractéristiques des Matériaux doublement positifs (DPS) :

Les caractéristiques des matériaux DPS sont :

- **Permittivité ( $\epsilon$ ) positive** : Les DPS ont une permittivité positive, ce qui signifie qu'ils réagissent de manière conventionnelle aux champs électriques. En d'autres termes, ils ne présentent pas d'anomalies dans leur réponse aux ondes électromagnétiques en ce qui concerne la polarisation électrique.
- **Perméabilité ( $\mu$ ) positive** : Les DPS ont également une perméabilité positive, ce qui signifie qu'ils réagissent de manière classique aux champs magnétiques. Ils ne présentent pas de comportement inhabituel en ce qui concerne la magnétisation.
- **Utilisations classiques** : Les DPS sont utilisés dans des applications où les propriétés électromagnétiques classiques et prévisibles sont requises. Par exemple, ils sont couramment utilisés dans la conception d'antennes, de circuits électriques, de guides d'ondes, et d'autres dispositifs de micro-ondes et d'électronique.

En résumé, les Matériaux doublement positifs (DPS) sont des matériaux dont la permittivité et la perméabilité sont toutes deux positives, ce qui les distingue des métamatériaux qui peuvent avoir des permittivités et des perméabilités négatives. Les DPS se conforment aux lois électromagnétiques conventionnelles et sont utilisés dans des applications où un comportement électromagnétique classique est souhaité.

### II.3.2 Les Matériaux à perméabilité négative (MNG):

L'innovation derrière l'introduction des matériaux à perméabilité négative, réalisée à l'aide de matériaux ordinaires métallo-diélectriques qui ne présentent pas nécessairement d'activité magnétique, réside dans l'exploitation des courants de conduction générés à la surface des

métaux lorsqu'ils sont exposés à une onde électromagnétique provenant d'une source externe. Dans certaines configurations, ces courants générés à la surface du conducteur peuvent être suffisamment importants pour induire un comportement de type "métamatériau", même si la taille des motifs est bien en deçà de la longueur d'onde incidente ( $\ll \lambda$ ). En 1999, J. Pendry a été le premier à mettre en œuvre cette idée en proposant une configuration originale comprenant un réseau de structures métalliques disposées sous la forme d'un motif en "rouleau suisse" (Swiss-Roll), comme illustré dans la figure 2. II Il s'agit d'une structure artificielle à résonance magnétique, sans avoir besoin d'utiliser un matériau magnétique. Sur le graphique, l'axe des X représente la fréquence tandis que l'axe des Y représente l'amplitude.

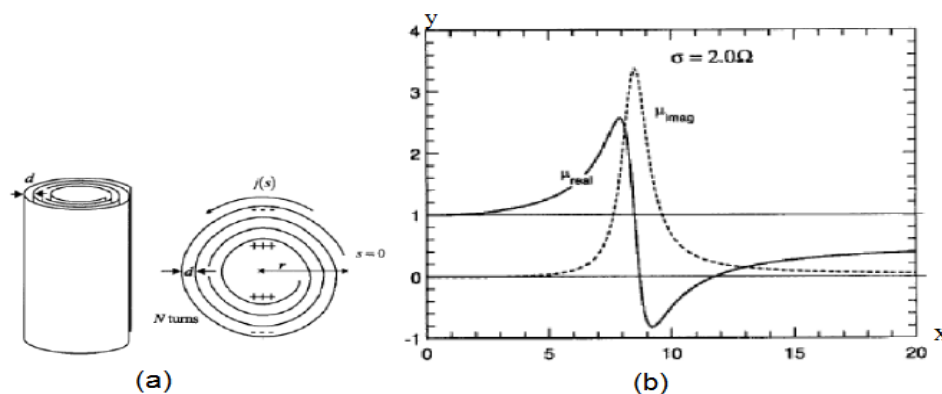


Figure II-2:(a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry (b) la variation de la perméabilité effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence [3].

Grâce aux avancées de Pendry, il est devenu possible de concevoir des milieux qui ne sont pas intrinsèquement magnétiques, mais qui présentent néanmoins une réponse magnétique. Ces recherches se concentrent sur l'étude du magnétisme généré par une inclusion métallique connue sous le nom de "split ring resonator" (SRR) ou "résonateur en anneau fendu" (RAF). Comme illustré la figure II.3.

Ce résonateur se compose de deux anneaux fendus concentriques, étant arrangés en sens opposé. Les dimensions caractéristiques de ces anneaux sont considérablement plus petites que la longueur d'onde de l'onde incidente, généralement de l'ordre de  $\lambda/10$ . En raison de ces dimensions réduites par rapport à la longueur d'onde, l'onde électromagnétique ne peut pas percevoir la structure interne du milieu, mais elle reflète plutôt les paramètres effectifs de l'ensemble du milieu.

En plus de sa résonance, ce composant génère une perméabilité effective négative dans une bande de fréquence étroite autour de sa résonance. Un autre avantage de ce résonateur est son encombrement réduit, ce qui facilite son intégration dans les systèmes de télécommunications.

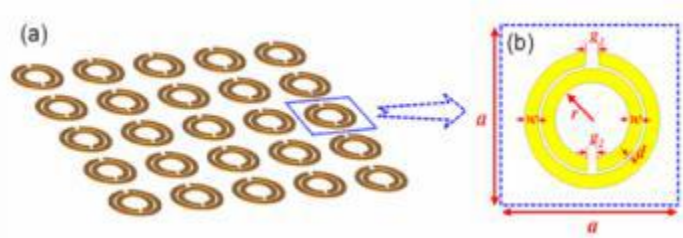


Figure II-3:(a) Réseau de RAF introduit par Pendry, (b) : Cellule unitaire du RAF[ 3].

L'expression de la perméabilité effective est donnée par :

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\gamma\omega} \quad \text{II.1)}$$

F : le volume de la structure.

$\omega^2$  : La pulsation angulaire,

$\omega_0^2$  : La pulsation de résonance

### II.3.3 Les Matériaux à permittivité négative (ENG) :

Selon le modèle de Drude, les métaux ne sont pas des milieux préparatifs à partir d'une certaine fréquence qui est la fréquence Plasma électrique ( $\omega_{pe}$ ). En fait, en dessous de cette fréquence les métaux présentent une permittivité négative.

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega c} \quad (\text{II.2})$$

Avec :  $\omega_{pe}$  : la pulsation du plasma électrique.

$\omega c$ : la pulsation de collision.

J.Pendry, proposa de réaliser un plasma artificiel en diluant le milieu métallique afin d'abaisser sa fréquence plasma et de satisfaire les conditions d'obtention d'une permittivité négative en dessous de l'ordinaire.

Sachant que la fréquence plasma électrique s'écrit sous la forme suivante

$$\omega_{pe}^2 = \frac{\rho e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} \quad (II.3)$$

Avec :  $\rho$  : La densité des électrons.

$e$  : La charge des électrons.

$m_{eff}$  : La masse effective des électrons.

L'approche consistait à créer un réseau d'inclusions métalliques plus massives, caractérisées par une densité d'électrons moindre. La configuration choisie (illustrée dans la Figure 4) repose sur un réseau de tiges métalliques ayant un rayon  $r$  et un espacement de réseau  $a$ . Dans cette configuration, la fréquence de plasma prend la valeur suivante :

$$\omega_e^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (II.4)$$

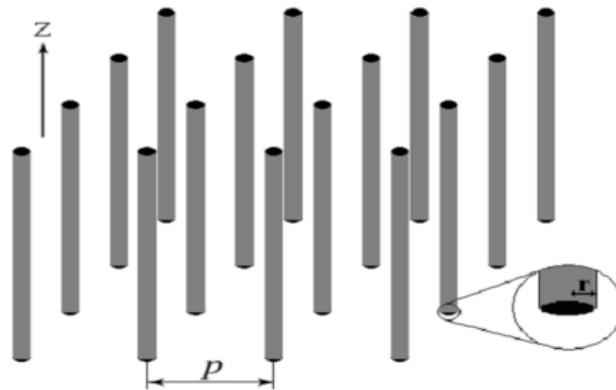


Figure II-4: Métamatériaux ENG formé par un réseau de tiges métalliques [4].

### II.3.4 Les Matériaux doublement négatifs (DNG) :

Les matériaux DNG se caractérisent par leur permittivité et leur perméabilité simultanément négatives, et ces métamatériaux peuvent être construits en utilisant des cellules "imbriquées" ou des cellules "combinées".

Le premier type, les cellules "imbriquées", combine deux cellules unitaires de base : l'une de type MNG et l'autre de type ENG. À la résonance, cette cellule composite présente un phénomène doublement négatif. Un exemple de ce type de cellule est réalisé par l'équipe de D.R. Smith et consiste en une combinaison de la cellule (SRR+Tige), comme illustré dans la Figure 7

La seconde option, les cellules "combinées", associe deux cellules unitaires de base : la SRR, qui manifeste une activité magnétique, et le réseau de tiges, qui est responsable de l'activité électrique. À la résonance, cette cellule composite démontre un phénomène doublement négatif, comme représenté dans la Figure II.5.a.

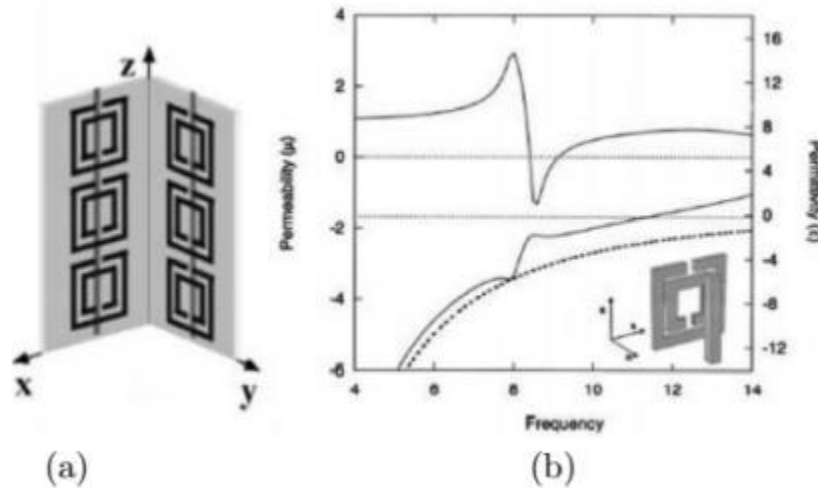


Figure II-5 :(a) cellule DNG- "SRR+Tige". (b) perméabilité et permittivité de la cellule "SRR+Tige"

Le deuxième type est basé sur un seul motif responsable sur une double activité simultanément. Comme exemple, la cellule DNG ayant l'allure de la lettre grecque «  $\Omega$  » a été introduite par l'équipe de N.Engheta [3] (Figure II.6), et repoussée par H.Griguer [3\_4]

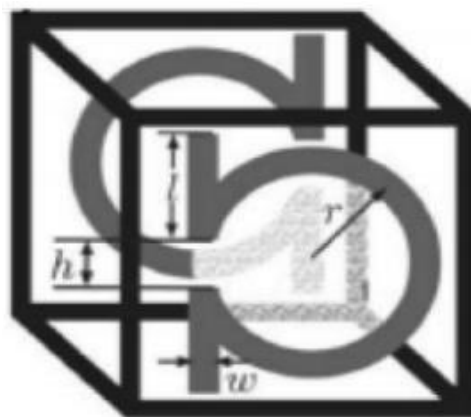


Figure II-6:Cellule DNG sous forme de «  $\Omega$  ».

## II.4 Applications liées aux antennes :

Les métamatériaux font l'objet de recherches intensives pour de nombreuses applications, notamment dans le domaine des télécommunications où leur utilisation prédomine principalement dans la conception d'antennes à métamatériaux.

Les applications liées aux antennes comprennent plusieurs objectifs tels que l'élargissement de la bande passante, la suppression de certaines bandes de fréquences indésirables, l'augmentation de la directivité, l'amélioration du gain, et la miniaturisation.

Pour élargir la bande passante, diverses techniques basées sur les métamatériaux sont explorées. Par exemple, il est possible de concevoir des antennes patch en enlevant des parties métalliques du patch et du plan de masse en les remplaçant par des structures périodiques bidimensionnelles composées de résonateurs en anneaux fendus ou d'autres types de cellules unitaires à métamatériaux, tels que le résonateur en S ou en forme d'oméga. La Figure II .7. illustre ce concept.

Chaque cellule unitaire représente une fente qui peut induire de nouvelles résonances. Le choix de la forme et de la taille de ces fentes détermine les fréquences de fonctionnement de l'antenne et les impédances d'entrée. La combinaison des résonances des fentes avec la résonance de l'élément métallique favorise l'élargissement de la bande passante. En outre, pour ce type d'antennes, le lobe principal du diagramme de rayonnement change d'orientation, passant de la verticale à l'horizontale grâce à l'influence des métamatériaux.

Un exemple d'application des métamatériaux pour améliorer l'adaptation des antennes patch est l'utilisation de fentes de type SRR ou DRR intégrées dans le patch ou le plan de masse. Dans une étude , l'insertion de trois fentes de type DRR dans un patch rectangulaire a permis d'obtenir une adaptation satisfaisante avec un niveau d'atténuation inférieur à -15 dB sur l'ensemble de la bande de fréquences définie par la FCC (3.1-10.7 GHz) [4].

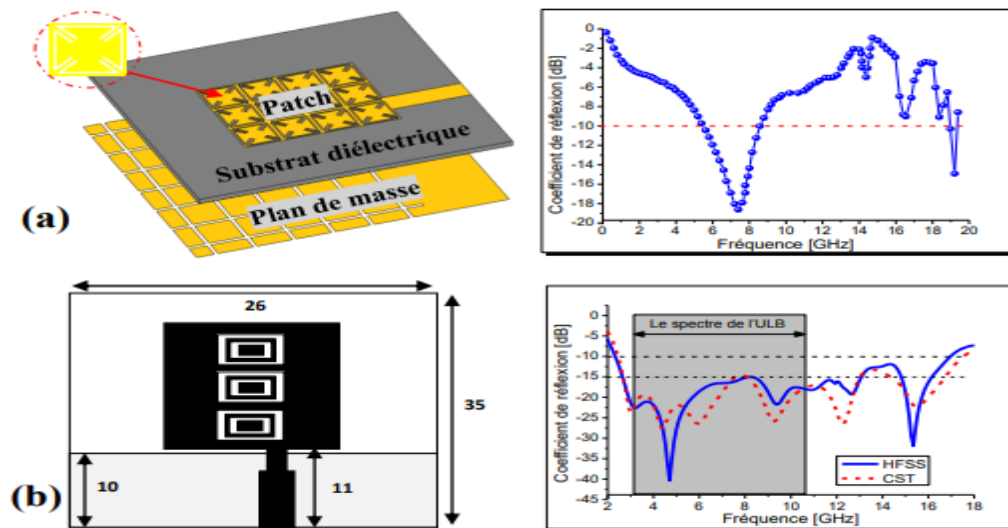


Figure II-7:(a) antenne patch à large bande et leur S11, (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [5].

L'utilisation de structures métamatériaux telles que les résonateurs en anneau fendu (RAF) ou les résonateurs en anneau fendu complémentaire (RAFC) offre également la possibilité de bloquer certaines bandes de fréquence en raison de leurs propriétés inhabituelles. Lorsque les ondes électromagnétiques se propagent le long des résonateurs en anneau fendu (SRR) dans une direction donnée, la polarisation du champ électrique reste alignée avec l'axe, de même que la polarisation du champ magnétique. Cette propriété particulière permet à ces structures de réfléchir de manière presque parfaite les ondes électromagnétiques.

Pour obtenir une fonction de suppression de bande dans les antennes à ultra-large bande (ULB), des chercheurs comme Cheolbok Kim et al. ainsi que J. Kim et al. [6\_7] ont intégré la structure SRR à l'élément rayonnant et à la ligne d'alimentation CPW. Cette méthode est illustrée dans la Figure II.8.

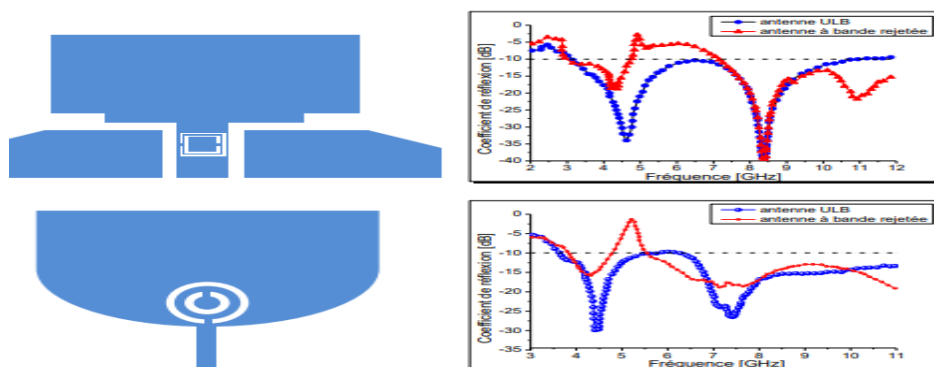


Figure II-8:Structures d'antenne patch monopole à bande coupée et leur S11 [6\_7]

Dans le domaine des antennes, certains métamatériaux trouvent des applications grâce à leurs propriétés réfléchissantes. Plus précisément, ils permettent la création de conducteurs magnétiques matriciels, connus sous le nom d'Artificial Magnetic Conductors (AMC). Du point de vue de leurs caractéristiques de réflexion, ces AMC agissent comme des équivalents magnétiques de surfaces métalliques, présentant un déphasage nul lors de la réflexion. Cette particularité offre la possibilité de significativement réduire l'encombrement des systèmes comprenant une antenne associée à un plan réflecteur à l'arrière, tels que les antennes à cavité [7,8], ou les antennes avec un plan de masse, notamment les antennes patch [9]. De plus, ces AMC permettent également de réduire les ondes de surface sur les plans réflecteurs, qui sont sources d'interférences indésirables, notamment dans les applications de réseaux d'antennes ou de systèmes Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) [9, 10].

Certaines applications explorent également les propriétés de réfraction de certains métamatériaux. Par exemple, en plaçant une antenne omnidirectionnelle à l'intérieur d'une lame de métamatériau avec un indice effectif proche de zéro, on peut considérablement augmenter la directivité, créant ainsi un lobe principal étroit orienté perpendiculairement à la lame [11].

Pendant plusieurs années, les matériaux à indice négatif ont suscité un fort intérêt parmi les experts en antennes. Ces matériaux ont été envisagés pour la miniaturisation d'antennes et l'optimisation de leurs performances [12]. Par exemple, Mohmoud Abdalla et al. ont développé une antenne patch compacte à triple bande pour les applications WiMAX [13], en utilisant un métamatériau. Cette antenne est basée sur une antenne patch rectangulaire monopôle alimentée par une ligne microbande coplanaire (CPW) et deux cellules de métamatériau. Chaque cellule peut être réglée individuellement pour résonner à une fréquence différente, permettant ainsi la couverture de deux bandes de fréquences distinctes. L'antenne patch monopôle contribue à obtenir la troisième bande de fréquences. Cette conception a permis d'obtenir des réductions de taille de 66%, 50% et 25% respectivement à 2,4 GHz, 3,5 GHz et 5,5 GHz.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, nous avons exploré l'univers des métamatériaux, en mettant particulièrement l'accent sur les métamatériaux à indice négatif, également appelés matériaux à main gauche. Nous avons présenté leurs principales caractéristiques discuté à leur

réalisation à travers des milieux composites ,et mis en lumière leurs applications significatives dans le domaines de l' optique et des microondes .

Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons sur l'application des cellules métamateriaux pour l'amélioration d'un system d'antenne MIMO .La conception de ces structures sera réaliser en utilisant des simulateurs électromagnétiques tels que le CST Microwave Studio.

## Bibliographie

- [1] F. GRANGE, "Matériaux composites pour antenne miniature intégrée", thèse de doctorat, Université de rennes 1, 2010.
- [2]. V. G. Veselago, « The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of epsilon and mu ». Soviet Physics Usp, vol. 10, no. 4, pp 509, 1968.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, « Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena ». IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [4] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, « Extremely low Frequency plasmons in metallic mesostructures ». Physical Review Letters, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, 1996.
- [5] C. Kim; J. Jang; Y. Jung; H. Lee; J. Kim; S. Park and M. S. Lee, "Design of a frequency notched UWB antenna using a slot-type SRR", International Journal of Electronics and Communication, (2009), 1087-1093.
- [6] J. Kim; C. S. Cho and J. W. Lee, "5.2 GHz notched ultra-wideband antenna using slot-type SRR", Electronics Letters, 42 (2006), 315-316.
- [7] A.P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang et J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53 (2005), 209 - 215.
- [8] A. Ourir, A. de Lustrac et J.-M. Lourtioz, "All-metamaterial-based subwavelength cavities (ultrathin directive antennas)", Applied Physics Letters, 88 (2006), 084103.
- [9] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez Broas, G. Alexopoulos et E. Yablonovitch, "Impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47 (1999), 2059 - 2074.
- [10] K. M. K. H. Leong, C. J. Lee and T. Itoh, "Compact metamaterial-based antennas for mimo applications", International Workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, Cambridge, UK, 21-23 March 2007.
- [11] S. Enoch, G. Tayeb, P. Sabouroux, N. Guérin et P. Vincent, "A metamaterial for directive emission" Physical Review Letters, 89 (2002), 213902.

[12] H. A. Jang, D. O. Kim, and C. Y. Kim, “Size Reduction of Patch Antenna Array Using CSRRs Loaded Ground Plane”, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings KL, MALAYSIA, 27-30 March, 2012.

[13] M. Abdalla, U. Abdelnaby and A. A. Mitkees, “Compact and Triple Band Meta-Material Antenna for All WiMAX Applications”, International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Nagoya, Japan, 29 Oct.-2 Nov, 2012.

# **Chapitre III: SIMULATION D'UNE ANTENNE MIMO INSPIREE DES MMTs**

### III.1 Introduction

Ces dernières années, la croissance intense de nombreux services avancés a accru la demande de capacité de transmission de données élevée et donc de débit de données élevé. Un seul élément d'antenne présente un large diagramme de rayonnement et une faible directivité. Cette dernière peut être élevée en augmentant les dimensions physiques du patch, mais cela n'est pas pratique. Alternativement, la taille électrique de l'antenne peut être augmentée en assemblant un réseau d'éléments similaires pour améliorer la directivité de l'antenne [1]. Une antenne MIMO peut être vue comme une bonne solution.

Les antennes imprimées sont les meilleures candidates pour les éléments réseaux en raison de leurs avantages en termes de profil bas, de légèreté, de faible coût et de facilité de fabrication [2]. Le couplage mutuel entre les éléments d'antenne affecte l'impédance, le diagramme de rayonnement et le gain du réseau adaptatif [3]. Pour éviter la désadaptation de l'impédance totale, l'impédance mutuelle doit être complètement réactive à la fréquence de résonance [4]. Par ailleurs, le couplage mutuel devient très important dans les réseaux. Ce couplage résulte de deux raisons : le rayonnement en espace libre et les effets des ondes de surface [5, 6]. Diverses techniques ont été suggérées par plusieurs chercheurs pour atténuer les effets de couplage comme la méthode de découplage par neutralisation et celle par DGS [7–9]. Une autre approche simple et attrayante pour découpler les antennes consiste à utiliser des structures métamatériaux [10–12].

Dans ce dernier chapitre, nous allons concevoir et simuler une antenne MIMO applicable pour les communications 5G. Le logiciel de simulation CST (computer simulation technologie) a été utilisé pour la conception du réseau d'antennes. Les différentes sections de ce chapitre seront organisées comme suit : La première section abordera la conception de l'élément d'antenne qui sera utilisé pour définir le réseau d'antennes. Ensuite, nous procéderons à la simulation de d'une antenne MIMO à deux éléments inspirée des MMTs. Le but de cette étude est de montrer le rôle que peut jouer ces structures pour minimisée le couplage entre les deux antennes.

### III.2 Présentation de logiciel CST :

Le logiciel CST [computer simulation technologie] est un puissant outil de simulation électromagnétique largement utilisé dans l'industrie et la recherche.

Le CST offre une suite complète de fonctionnalités pour modéliser et analyser des systèmes électromagnétique complexes, ce qui permet aux ingénieurs de concevoir et d'optimiser divers dispositifs tels les antennes, les circuits imprimés, les composants radiofréquence, les radars, et bien d'autres encore.

Le logiciels CST repose sur la méthode des intégrales finis [fft], une approche numérique utilisé pour résoudre divers problèmes électromagnétique, que ce soit dans le domaine temporel ou fréquentiel cette méthode discrétise et reformules les équations de maxwell sous une forme intégrale pour résoudre ces équations. Le logiciels définit un domaine de calcul approprié.

### III.2.1 Les caractéristiques de logiciels :

- **Modélisation Géométrique :** Le logiciel CST permet de créer des modèles géométriques 3D précis de composants ou de systèmes électromagnétique. Il offre une interface pour dessiner et manipuler des objets en utilisant des primitives, des formes complexes ou en important des modèles externes.
- **Simulation électromagnétique :** Le cœur du logiciel CST réside dans sa capacité à effectuer des simulations électromagnétique précises. Il utilise des équations numériques avancées basée sur les méthodes intégrales [FTT] pour résoudre les équations de Maxwell.
- **Analyse de propagation des ondes :** L'outil CST permet d'analyser la propagation des ondes électromagnétiques dans divers milieux, tels que les matériaux diélectriques et les structures multicouches. Il offre des outils pour étudier la réflexion, la transmission, la dispersion et d'autres phénomènes associés à la propagation des ondes.
- **Analyse de compatibilité électromagnétique :** Le CST est utilisée pour évaluer et améliorer la compatibilité électromagnétique des systèmes électroniques. Il permet de prédire les interférences électromagnétiques, de détecter les problèmes de couplage, de réaliser des analyses de perturbations du rayonnement et d'optimiser la mise à la terre et le blindage des composants.

### III.3 Conception et simulation d'une antenne MIMO à deux éléments

#### III.3.1 Conception de l'antenne initiale

Étant donné que le système proposé implique un système MIMO à deux éléments, notre première étape a été la conception de l'élément d'antenne. Dans ce contexte, Nous avons choisi d'étudier une antenne patch de forme circulaire destinée pour les applications de communication 5G opérant à la fréquence 25 GHz. L'antenne est déposée sur un substrat diélectrique Rogers RT Duroid ayant une permittivité diélectrique  $\epsilon_r = 2.2$ , et une épaisseur  $h = 0.254$  mm de taille  $W \times L$ . Un plan de masse total recouvre toute la face arrière du substrat telle que le montre la figure III.1.

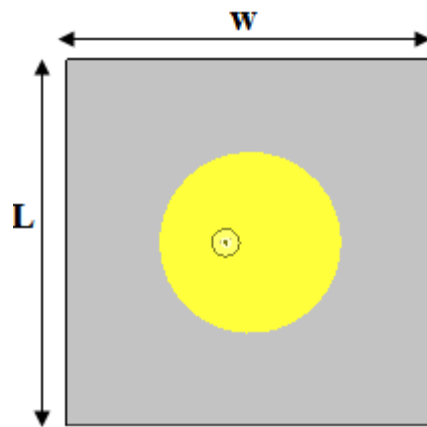


Figure III-1 :Antenne patch circulaire initiale

L'antenne conçue est alimentée par un câble coaxial d'impédance caractéristique  $50 \Omega$  situé à 0.6 mm à partir du centre de la structure pour assurer une bonne adaptation. La figure ci-dessous représente les trois couches constituant notre antenne imprimée.

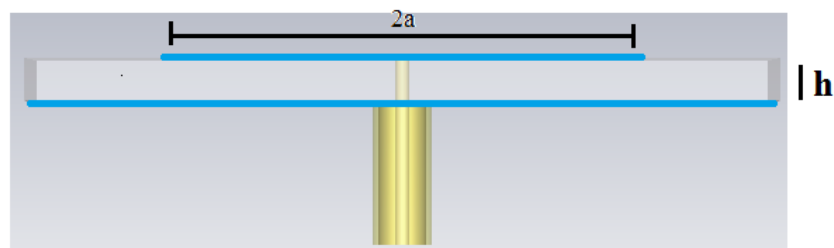


Figure III-2 :Représentation des trois couches de l'antenne : patch, plan de masse et substrat.

Le rayon  $a$  du patch a été calculé en utilisant l'équation suivante [13] :

$$a = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2 \cdot h}{\pi \varepsilon_r} \left[ \ln \left( \frac{\pi F}{2 \cdot h} \right) + 1.7726 \right] \right\}} \quad (\text{III.1})$$

$$F = \frac{8.791 \cdot 10^9}{f_r \sqrt{\varepsilon_r}} \quad (\text{III.2})$$

Où :

$\varepsilon_r$  - Constante diélectrique du substrat

a - Rayon de patch

$f_r$  - Fréquence de résonance

h - Hauteur du substrat

Les dimensions physiques de l'antenne patch élémentaire sont illustrées par le tableau ci-dessous.

| Paramètres | Dimensions (mm) |
|------------|-----------------|
| a          | 2.2             |
| W          | 8.5             |
| L          | 8.6             |

Tableau III-1: Paramètres de l'antenne circulaire

### III.3.2 Conception d'un système d'antenne à deux éléments

Dans la présente section, nous présentons un système d'antennes résultant de la disposition conjointe de deux antennes circulaires déjà étudiées précédemment. Ces deux antennes sont de taille et de configuration identiques et sont positionnées de manière symétrique sur le même plan de masse, chacune étant alimentée par son propre port, noté (P1) pour l'élément rayonnant 1 et (P2) pour l'élément rayonnant 2. Comme illustré sur la Figure III.3, ces antennes sont séparées par une distance  $D=7.9 \text{ mm}$  ( $0.67\lambda$ ) à la fréquence centrale de 25 GHz. Les dimensions totales du réseau d'antennes sont  $8,6 \times 17 \text{ mm}^2$ .

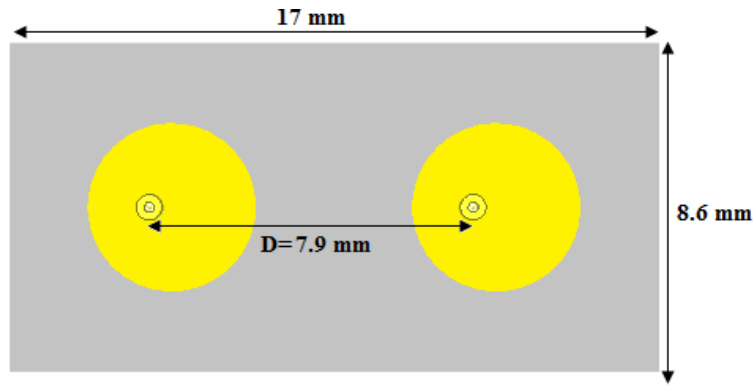


Figure III-3 :Géométrie du système MIMO proposé

### III.4 Configuration MIMO à deux éléments inspirée des Méta-matériaux

Dans les systèmes dotés de plusieurs antennes et/ou dans les systèmes MIMO, l'isolement entre les éléments individuels qui les composent revêt une importance cruciale et doit être pris en compte comme l'un des paramètres essentiels. Car lorsque deux éléments d'antenne sont rapprochés, la répartition du courant sur l'un est affectée par le champ rayonné par l'autre. En raison de cet effet, l'impédance du port (impédance active) de tous les éléments du réseau est modifiée, affectant ainsi les performances du réseau. La solution à ce problème consiste à rapprocher l'impédance mutuelle de l'antenne (parties réelles et imaginaires) de zéro à la résonance de l'antenne. Cette condition peut être atteinte en augmentant l'isolation entre les éléments du réseau. La technique d'isolation par métamatériaux a été adoptée pour réduire le couplage entre les antennes circulaires. Des structures de filtrage CSRR sont introduites entre les patches en surface et le plan de masse afin d'examiner les caractéristiques de suppression du couplage mutuel.

#### III.4.1 La cellule SRR (Split Ring Resonator) et CSRR

Le premier modèle de SRR ou métamatériaux à perméabilité négative (mu-négatif MNG) a été initialement proposé par Pendry et al. [14]. L'application du principe de Babinet conduit à la mise en œuvre de SRR complémentaires [15]. Le CSRR ou métamatériaux à perméabilité négative (epsilon négatif ENG) a été introduit pour la première fois par l'équipe de F.Falcone [16] et est dérivé en appliquant le principe de dualité au SRR, et ceux en remplaçant le métal par du diélectrique et vice versa. Les propriétés électriques et magnétiques du CSRR sont

inter changées par rapport au SRR. Cependant, la fréquence de résonance du CSRR et du SRR devrait être approximativement la même [16].

La Figure III.4 montre le schéma et le modèle de circuit équivalent du CSRR. Le principal avantage du CSRR réside dans sa grande capacité de filtrage (réjection de bande), ce qui est utile pour la suppression du couplage, sa taille compacte (moins d'un dixième de  $\lambda$ ) et sa facilité de fabrication.

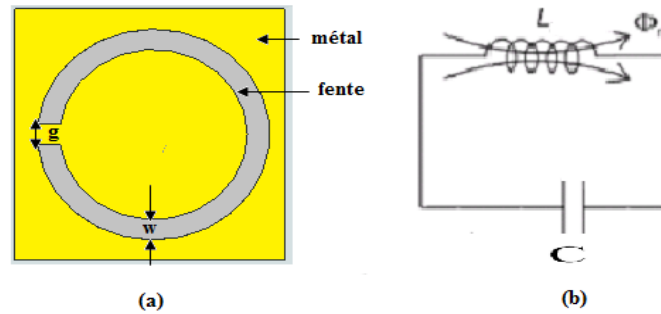


Figure III-4:Cellule unitaire CSRR. (a) schéma. (b) Modèle de circuit équivalent.

#### III.4.2 Simulation des structures SRR et CSRR

Afin de valider le concept du CSRR, nous avons tout d'abord commencé par la conception d'une cellule SRR de forme circulaire de rayon  $r$ , puis convertir cette dernière en une structure complémentaire. Les paramètres de conception proposés sont résumés sur le tableau III.2. Ces paramètres ont été optimisé pour un fonctionnement autour de la fréquence 25 GHz. Le substrat diélectrique utilisé est le RT 5880 utilisé dans la section précédente.

| Paramètres   | $r$  | $w$  | $G$  | $h$   | $t$   | $s$ |
|--------------|------|------|------|-------|-------|-----|
| Valeurs (mm) | 0.77 | 0.15 | 0.15 | 0.254 | 0.035 | 0.1 |

Tableau III-2:Dimension de la cellule unitaire.

La simulation est faite sur une bande de fréquence entre 20 GHz et 28 GHz. Des conditions aux limites de murs électrique (PEC) et magnétique (PMC) seront appliqués selon l'axe  $y$  et  $z$  respectivement. Les deux autres côtés sont utilisés pour l'excitation du signal comme le montrent la figures III .5. Sur la même figure, on représente les coefficients de réflexion et de transmission de la cellule unitaire, où on remarque que le coefficient de transmission  $S_{21}$  présente une résonance à la fréquence 25 GHz avec un niveau de -36.4 dB.

Ces deux coefficients seront utilisés par la suite pour le calcul des paramètres effectifs du milieu. Ces paramètres tel que la permittivité électrique ( $\epsilon$ ) et la perméabilité magnétique ( $\mu$ ) de la structure proposée sont illustrés sur la figure III.6 avec :

$$\epsilon = n / z \quad \text{III.3)}$$

$$\mu = n \times z \quad (\text{III.4})$$

où l'indice de réfraction ( $n$ ) et l'impédance d'onde ( $z$ ) sont calculés à l'aide des équations suivantes [17, 18].

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (\text{III.5})$$

$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (\text{III.6})$$

$k$  et  $d$  représentent le vecteur d'onde dans le vide de l'onde plane incidente et l'épaisseur du matériau respectivement.

La perméabilité est négative dans la bande de fréquence située entre 23.7 et 26.7 GHz, alors que la permittivité est positive comme indiqué sur la figure III.6.

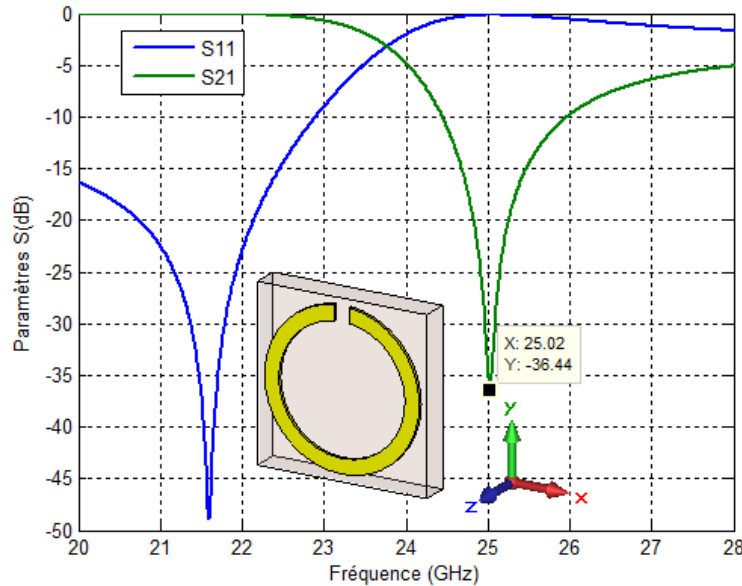


Figure III-5: Module de S11 et S21 de la cellule SRR

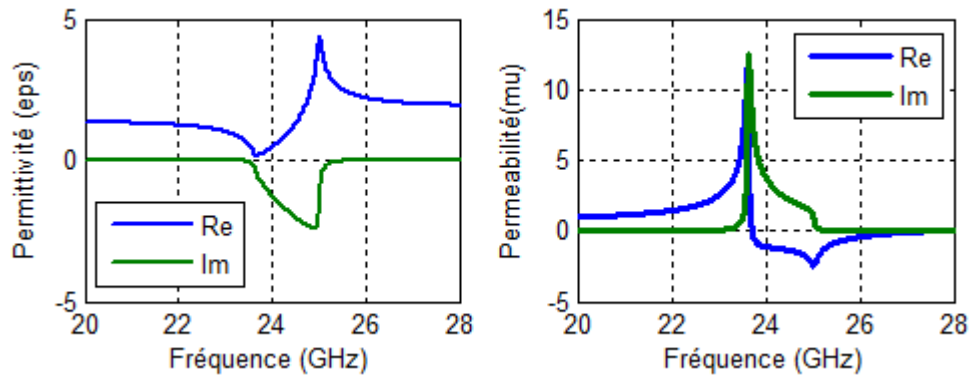


Figure III-6 : Paramètres effectifs de la cellule SRR

En revanche, et comme nous l'avons défini dans la section III.4.1, La différence essentiel entre le SRR et le CSRR est que le SRR présente une perméabilité négative, tandis que le CSRR possède une permittivité négative comme le montre la figure III.8(a). Elle est négative en partie réelle dans la bande de fréquences autour de la résonance, située entre 24.7 et 26.15 GHz, tandis que la perméabilité reste positive dans toute la bande du travail comme indiqué sur la figure III.8 (b).

Nous remarquons aussi que la structure du CSRR proposée est résonnante et présente une forte réjection de bande à la fréquence 25 GHz, comme le montre la figure III.7, ce qui implique que la majeure partie de l'énergie de l'onde incidente est bloquée par la cellule.

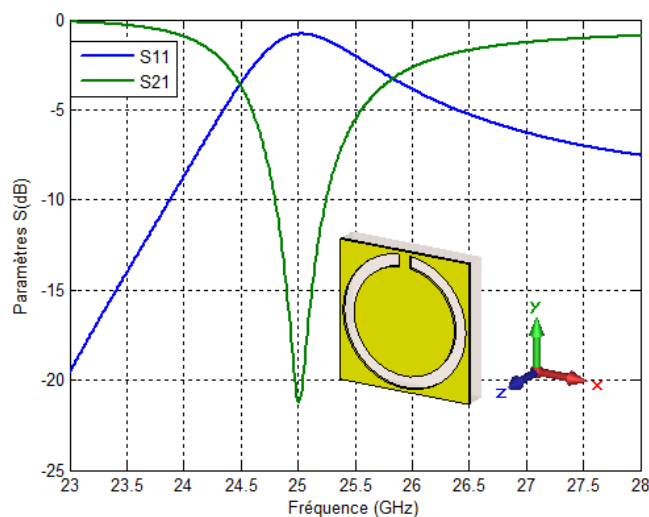


Figure III-7:: Module de S11 et S21 de la cellule CSRR

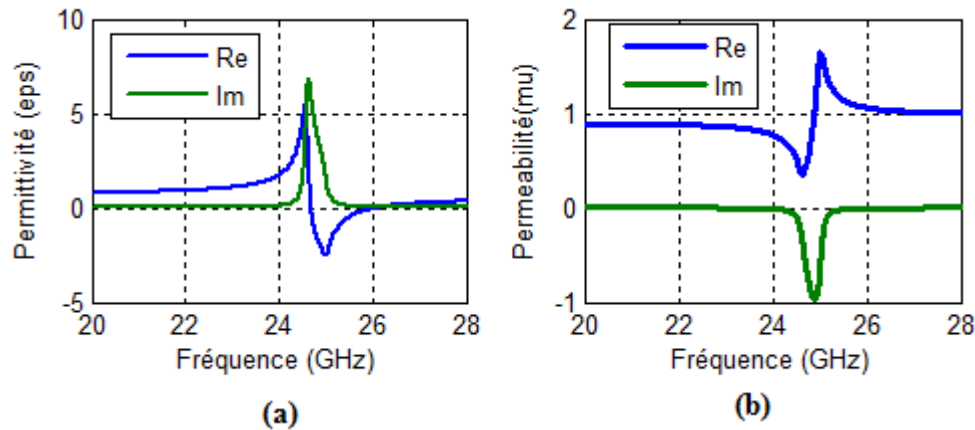


Figure III-8 : Paramètres effectifs de la cellule CSRR

### III.4.3 Conception et simulation de la structure CSRR sur un réseau d'antennes micro ruban.

Comme définit dans la section précédente, la méthode d'isolation utilisant des métamatériaux a été mise en place pour diminuer le couplage entre les antennes circulaires. En effet, afin de maximiser le rayonnement d'énergie par une antenne alimentée, il est essentiel de veiller à ce que toute l'énergie qui lui est fournie ne soit pas dissipée dans la seconde antenne. Par conséquent, il est impératif de réduire au minimum la valeur de  $S_{21}$ , qui est utilisée pour mesurer l'énergie rayonnée et caractériser le découplage entre les deux éléments rayonnants. Plusieurs orientations de cellules unitaires dans une disposition en réseau ont été analysées par les chercheurs, et il a été conclu que la structure en CSRR offre des caractéristiques optimales de réjection de bande lorsqu'on combine deux cellules en face-à-face avec une fente, par rapport à un réseau de cellules unitaires CSRR périodiques conventionnelles. L'objectif est d'améliorer les bonnes caractéristiques de réjection de bande en disposant périodiquement les CSRR dans un réseau. Trois cas de figure sont étudiés, tel que le montre la figure III.9. Le réseau CSRR est placé entre les patchs en surface, sur le plan de masse, puis à la fois en surface et sur le plan de masse comme illustré sur la figure III.9

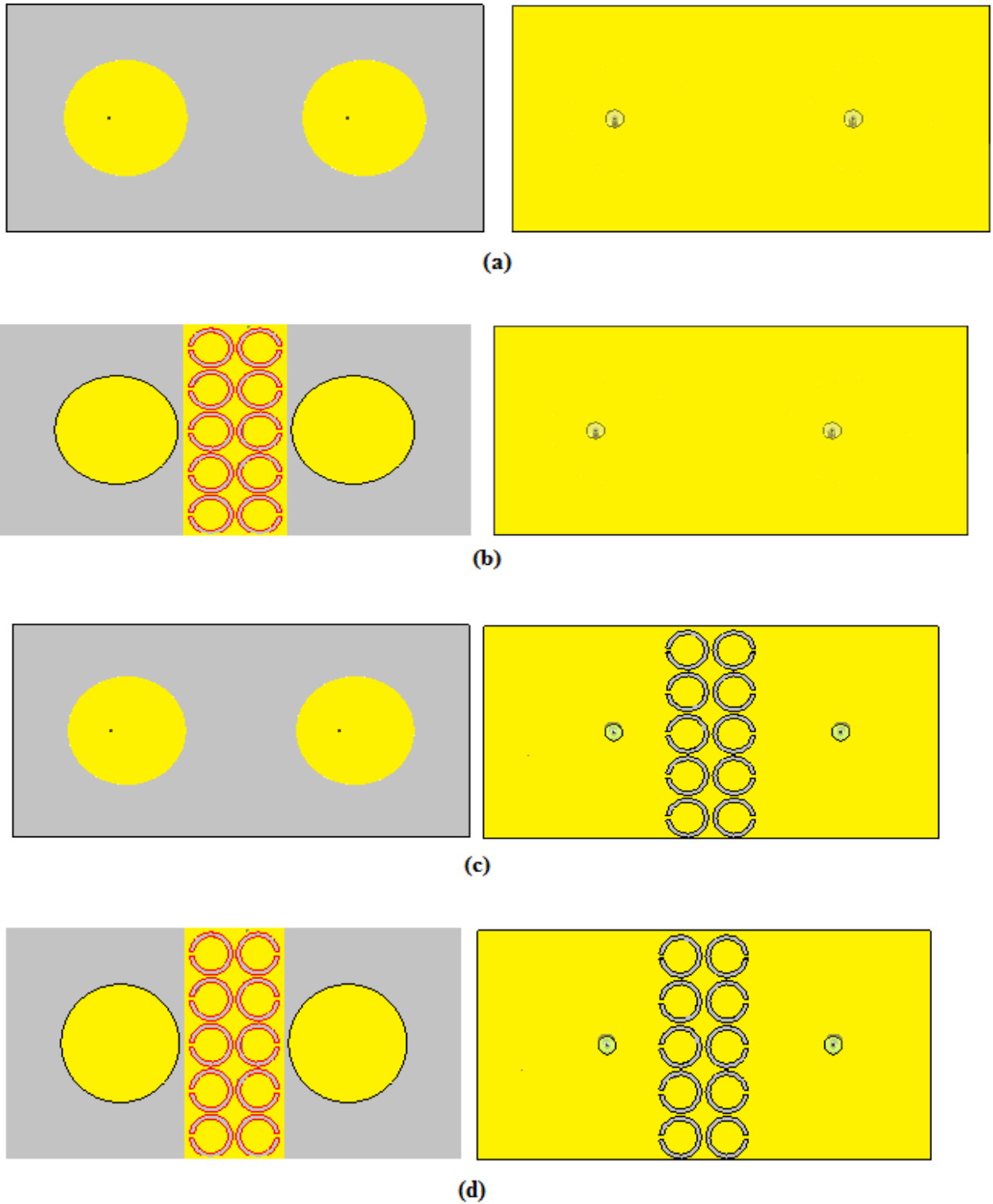


Figure III-9 : Vues de dessus et de dessous d'un réseau à deux éléments avec et sans éléments de découplage. (a) Sans CSRR. (b) Avec CSRR sur le plan de masse. (c) avec CSRR entre les deux patches. (d) Avec CSRR à la fois en surface et sur le plan de masse.

## III.5 Résultats des simulations

### III.5.1 Paramètres S

Les paramètres S décrivent comment les signaux sont transmis entre les ports d'un système électrique. La Figure III.10 présente la simulation des paramètres S pour l'antenne circulaire initiale. Comme le montre la figure, une excellente adaptation de -37,3 dB est obtenue à la fréquence de 25 GHz, ce qui répond aux exigences des applications de communication 5G. La Figure III.11 illustre les résultats de simulation des paramètres S du système MIMO à deux éléments proposé, sans avoir appliqué la méthode de découplage. Le coefficient de transmission  $S_{21}$ , qui représente l'isolation entre les deux ports d'alimentation de l'antenne, présente une valeur de -31.2 dB à la fréquence 25 GHz. Cette valeur du couplage mutuel entre les antennes est considérée comme élevée, ce qui nous a mené à améliorer l'isolation en insérant des cellules CSRR en méta-matériaux entre les éléments du patch.

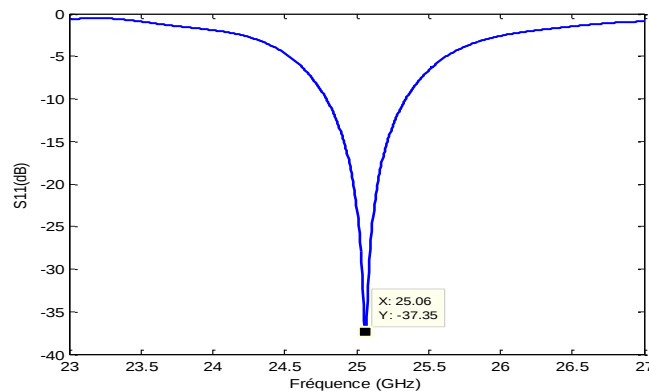


Figure III-10: Coefficient de réflexion de l'antenne circulaire initiale en fonction de la fréquence.

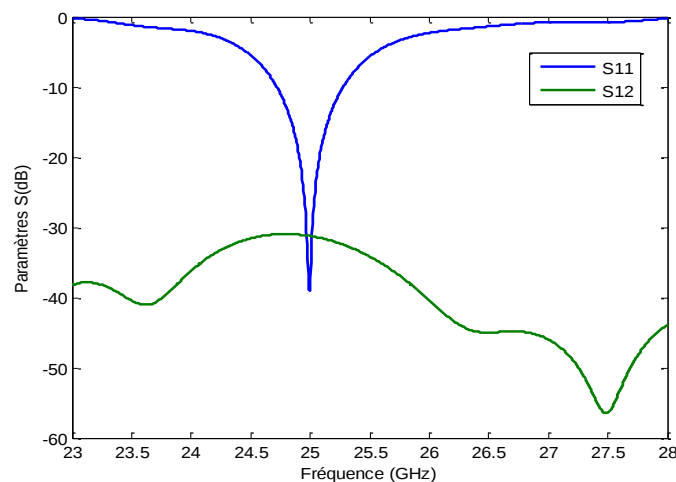
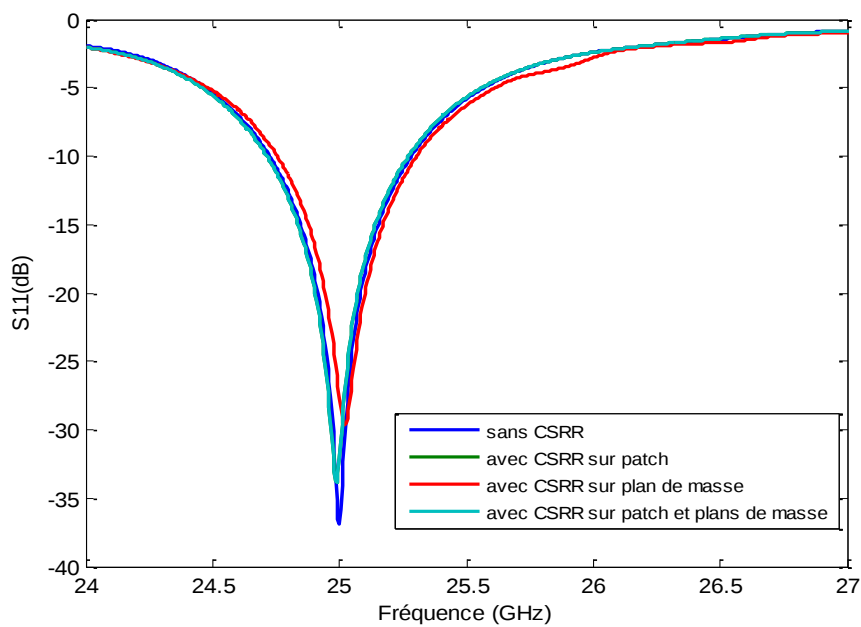
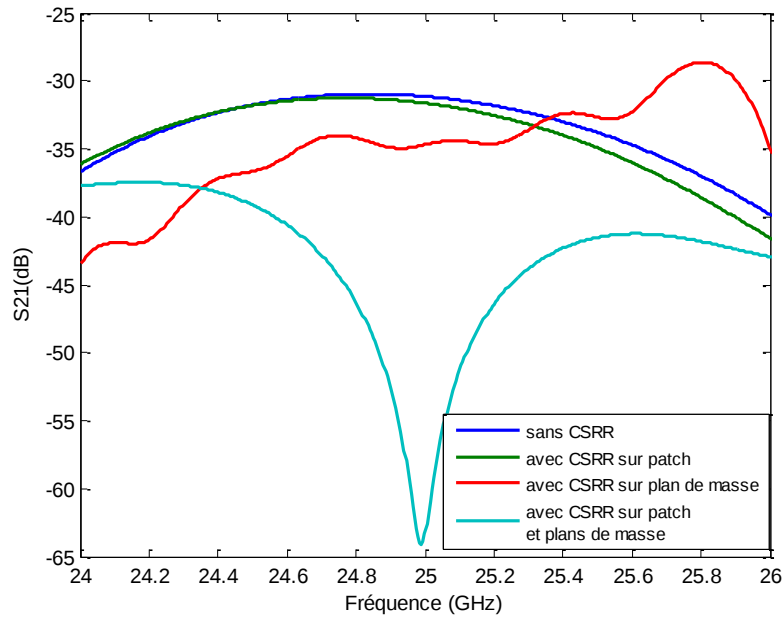


Figure III-11: Paramètres S du système MIMO à deux éléments sans découplage

La réponse des paramètres S pour le système multi-antennes proposé, qui intègre la méthode de découplage par MMTs, a été comparée pour différentes positions de la structure CSRR. Les réponses simulées sont présentées par la figure III.12. Nous remarquons d'après ces graphes que la présence du réseau de résonateurs n'a pas beaucoup d'impact sur l'adaptation de l'antenne, si nous le comparons avec le cas où il n'y a aucune cellule CSRR. En effet, à la fréquence de 25 GHz, le coefficient de réflexion pour les quatre cas de figure est inférieur à -10 dB et reste très satisfaisant. D'autre part, en se référant à la Figure III 12(b), le couplage mutuel a été réduit de -31.2 à -31,6 à -34.6 à -63,29 dB pour l'absence de découplage, CSRR sur le plan de masse, CSRR uniquement sur la surface du patch, et pour CSRR à la fois sur le plan de masse et sur la surface du patch, respectivement. Donc, une très bonne isolation est obtenue dans la dernière configuration avec ce type de cellules.



(a)



(b)

Figure III-12 : Paramètre S du système MIMO à deux éléments : (a) coefficient S11, (b) coefficient S21.

La suppression du couplage mutuel est donc obtenue en intégrant les cellules CSRR sur le plan de masse qui est responsable du courant de couplage. Cependant, cela dégrade les performances de rayonnement en raison de l'énergie puissante se propageant vers l'arrière. Pour supprimer cette forte perte d'énergie, Les CSRR ont été introduit sur la surface du patch, ce qui a amélioré le couplage mutuel en réduisant les rayonnements vers l'arrière. Par conséquent, la combinaison des cellules de deux côtés du substrat présente une réponse de suppression de couplage plus dominante.

Le comportement du système MIMO en termes d'isolation peut également être expliqué par l'analyse de la distribution du courant de surface de l'antenne à la fréquence du travail. La distribution du courant à 25 GHz dans les deux cas (avec et sans l'utilisation des métamatériau) est présentée sur la Figure III.13. Lors de l'excitation des deux ports de l'antenne un fort couplage mutuel se produit entre les deux éléments, le courant est fortement couplé au deuxième patch comme indiqué. Il est évident alors que le couplage mutuel sera réduit par l'insertion de cellules unitaires en métamatériau entre les deux éléments rayonnants. Ainsi, un couplage mutuel très faible est obtenu.

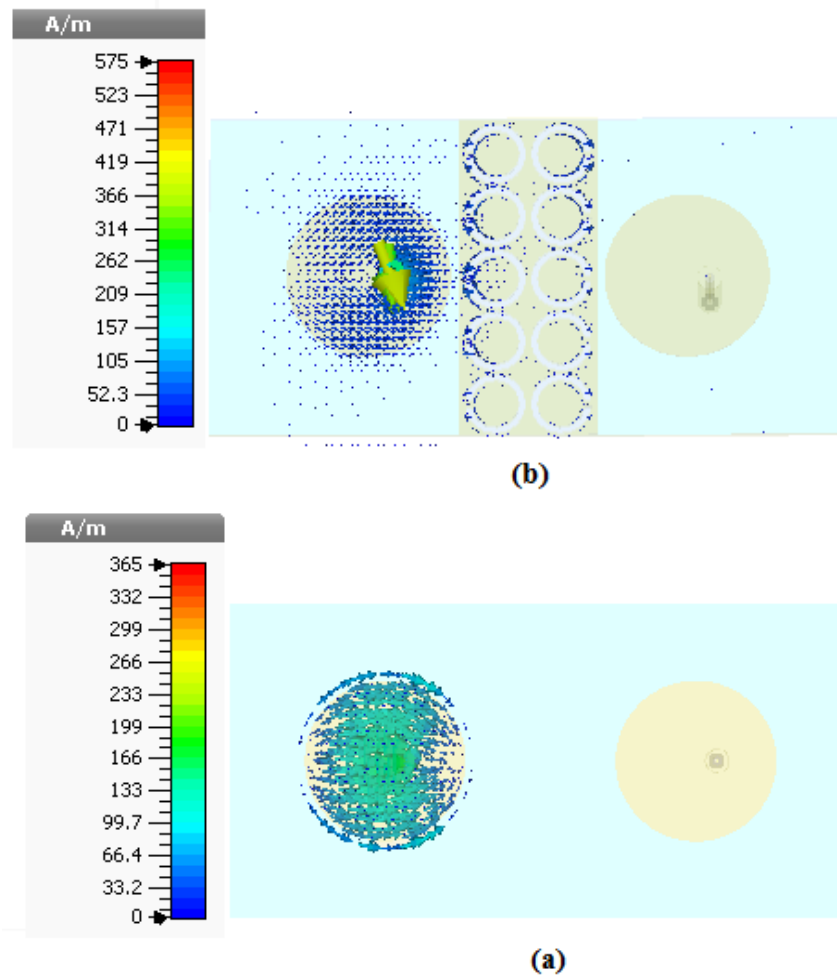


Figure III-13: Distribution du courant de surface de l'antenne MIMO : a) Sans CSRR, b) avec CSRR

### III.5.2 Caractéristiques de rayonnement

#### III.5.2.1 Diagrammes de rayonnement et gain

Une étude approfondie, principalement en ce qui concerne les caractéristiques de rayonnement de l'antenne MIMO dans les deux cas (avec et sans métamatériau), a également été réalisée. La Figure III.14 présente les diagrammes de rayonnement en coordonnées polaires simulés pour les deux plans principaux plans ( $\Phi = 0$ ) et ( $\Phi = 90$ ), à 25 GHz. Comme le montre la figure, l'introduction des cellules CSRR en métamatériau apporte une légère déviation des diagrammes de rayonnement. Le gain simulé de l'antenne MIMO proposée avec et sans cellule métamatériau est représenté sur la figure III.15. Comme le montre la figure, le gain de l'antenne est amélioré lorsque des cellules unitaires en métamatériau sont insérées au niveau du plan de masse et sur la surface du patch, par conséquent, le gain maximal réalisé de 7.56 dB est obtenu à 25 GHz.

Une comparaison entre le rayonnement spatial de l'antenne MIMO avec et sans technique d'isolation à la fréquence 25 GHz est illustrée dans la figure III.16. Nous observons une amélioration significative du gain entre la structure initiale et celle avec MMTs. En effet, le gain passe de 7.38 dB pour la structure sans CSRR à 7.56 dB pour l'antenne avec CSRR. Cependant, ce résultat demeure très satisfaisant.

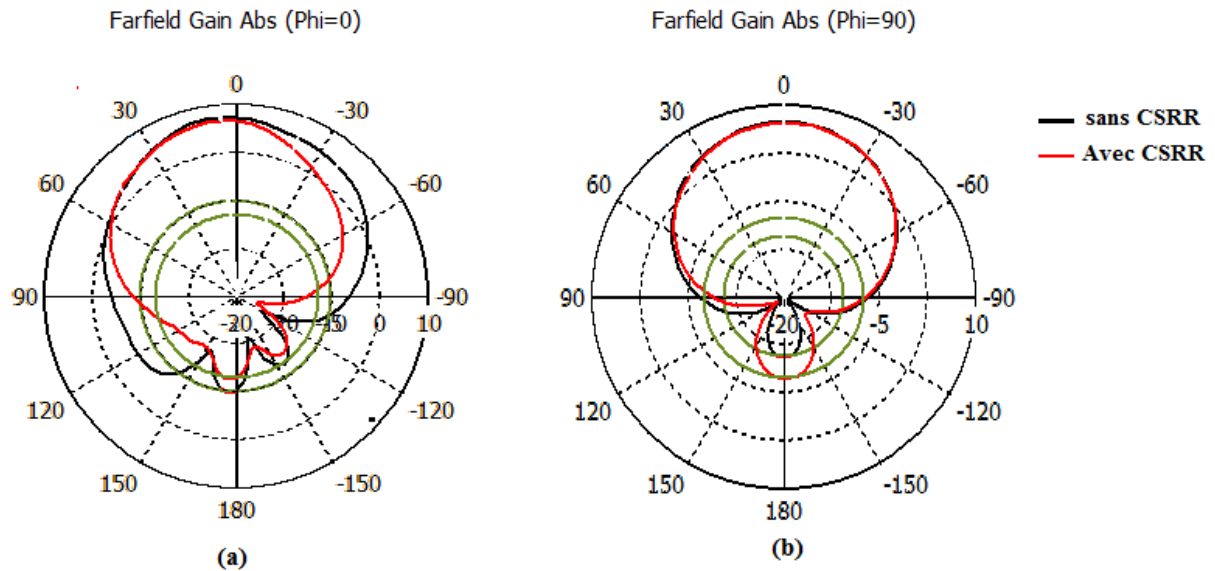


Figure III-14 :diagramme de rayonnement simulé (avec et sans CSRR) à 25 GHz (a)  $\phi = 0^\circ$  ; (b)  $\phi = 90^\circ$ .

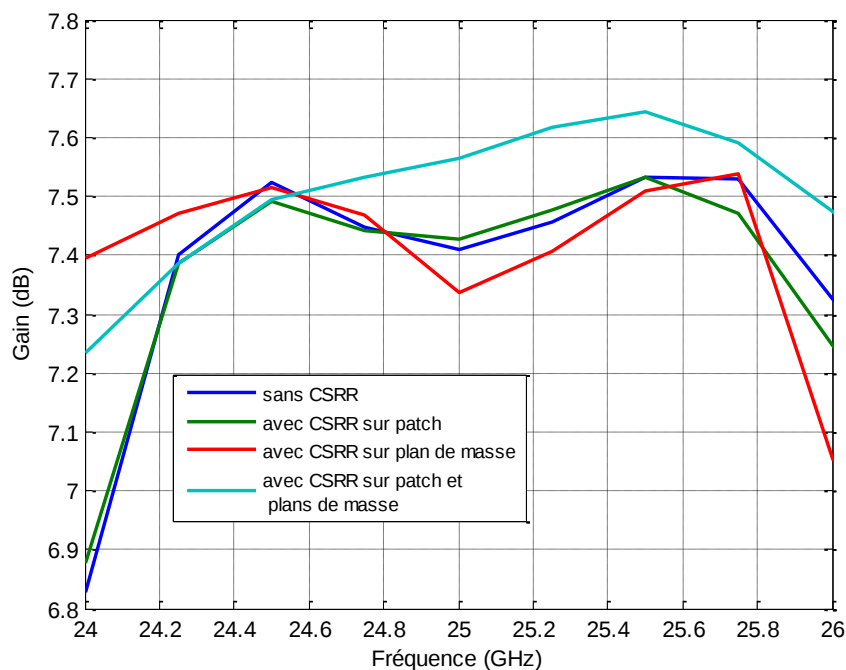


Figure III-15 :Variation de gain du système multi-antennes avec et sans technique de découplage pour différentes position du réseau CSRR.

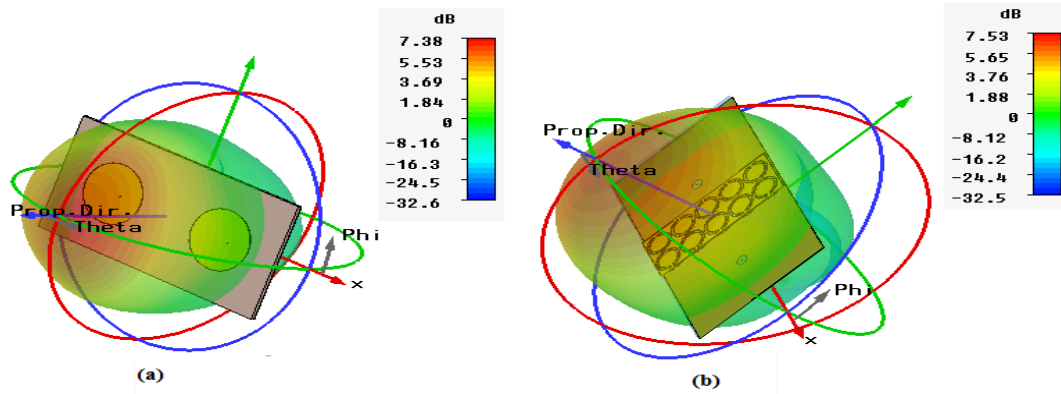


Figure III-16 :Rayonnement 3Dà la fréquence 25 GHz pour l'antenne MIMO (a) sans CSRR et (b) avec CSRR

Les performances des quatre cas de figures structures sont résumées dans le tableau III.3

| A 25 GHz      | Sans CSRR | CSRR sur patch | CSRR sur plan de masse | CSRR sur plan de masse+patch |
|---------------|-----------|----------------|------------------------|------------------------------|
| $S_{11}$ (dB) | -40.6     | -29.38         | -31.9                  | -20.8                        |
| $S_{21}$ (dB) | -31.2     | -31.64         | -34.6                  | -63.29                       |
| Gain (dB)     | 7.38      | 7.42           | 7.33                   | 7.56                         |

Tableau III-3:Les performances de l'antenne MIMO sans et avec MMTs

Une comparaison une la technique proposé et d'autres techniques basé sur les metamatériaux et résumer dans le tableau III-4, où nous remarquons que la structure en du filtrage en réseau CRR proposé présente une bonne amélioration dans les réseaux d'antennes par rapport à d'autres structures en MMTs illustrés dans le tableau suivant :

| Référence | La technique utilisée     | Fréquence (GHz) | Distance D    | Amélioration de l'isolation $S_{21}$ (dB) |
|-----------|---------------------------|-----------------|---------------|-------------------------------------------|
| [19]      | Defected ground structure | 6               | $0.3\lambda$  | 7.2                                       |
| [20]      | Slotted CSRR              | 5               | $0.5 \lambda$ | 10                                        |
| [21]      | Slotted combined CSRR     | 3.7             | $0.5\lambda$  | 10                                        |
| [22]      | Square CSRR               | 25              | $0.67\lambda$ | 23                                        |
|           | Proposed CSRR             | 25              | $0.68\lambda$ | 25                                        |

Tableau III-4 :Tableau comparatif des résultats de la littérature..

### III.5.2.2 Coefficient de corrélation, gain de diversité

Le paramètre qui permet de définir l'isolation et la corrélation dans un système MIMO est le ECC (Envelop Correlation Coefficient). C'est une mesure qui évalue la corrélation entre les diagrammes de rayonnement ou les performances de deux antennes ou plus dans un système de communication sans fil. Un ECC proche de 1 indique une **forte** corrélation, ce qui signifie que les antennes ont des performances similaires et sont fortement **couplées**. En revanche, un ECC proche de 0 indique une faible corrélation, ce qui signifie que les antennes ont des performances différentes et sont relativement **indépendantes** les unes des autres.

Avoir un ECC faible est donc très important pour garantir la robustesse de l'antenne MIMO proposée. La valeur du ECC peut être calculée à l'aide de la formule suivante [23].

$$ECC = \frac{|\int \int_{4\pi} (\vec{F}_i(\theta, \phi)) \times (\vec{F}_j(\theta, \phi)) d\Omega|^2}{\int \int_{4\pi} |(\vec{F}_i(\theta, \phi))|^2 d\Omega \int \int_{4\pi} |(\vec{F}_j(\theta, \phi))|^2 d\Omega}$$

où  $\vec{F}_i(\theta, \phi)$  décrit le diagramme de rayonnement en 3D lorsque l'antenne i est excitée et  $\vec{F}_j(\theta, \phi)$  décrit le diagramme de rayonnement en 3D lorsque l'antenne j est excitée.

$\Omega$  représente l'angle solide.

Sur la Figure III.17, on représente le coefficient de corrélation de l'antenne MIMO simulé à 25 GHz. Le ECC est très faible et proche de la valeur idéale et il est égal à  $1.48 \times 10^{-8}$  à la fréquence 25 GHz. Cela indique que le système d'antennes à deux éléments proposé est capables de fonctionner de manière plus indépendante, ce qui peut améliorer la qualité de la communication, réduire les interférences et augmenter la fiabilité, ce qui valide notre technique d'isolation utilisée dans ce travail.

D'autre part, un deuxième paramètre qui permet de caractériser un système MIMO est le gain de diversité (diversity gain DG). Il est généralement mesuré en décibels (dB) et représente l'amélioration de la performance obtenue grâce à l'utilisation de la diversité par un système de communication sans fil. Plus le gain de diversité est élevé, mieux c'est en termes de réduction des erreurs de transmission et d'amélioration de la qualité du signal. La diversité est donnée par la formule suivante [23] :

$$DG = 10 - \sqrt{1 - (ECC)^2}$$

La Figure III.18 présente le gain de diversité en fonction de la fréquence de l'antenne MIMO. À la fréquence 25 GHz, l'antenne MIMO proposée atteint un DG de 10 dB. Cependant, l'antenne proposée présente un DG supérieur à 10 dB sur toute la bande de fonctionnement. Ce qui répond à l'exigence de l'application de la communication 5 G.

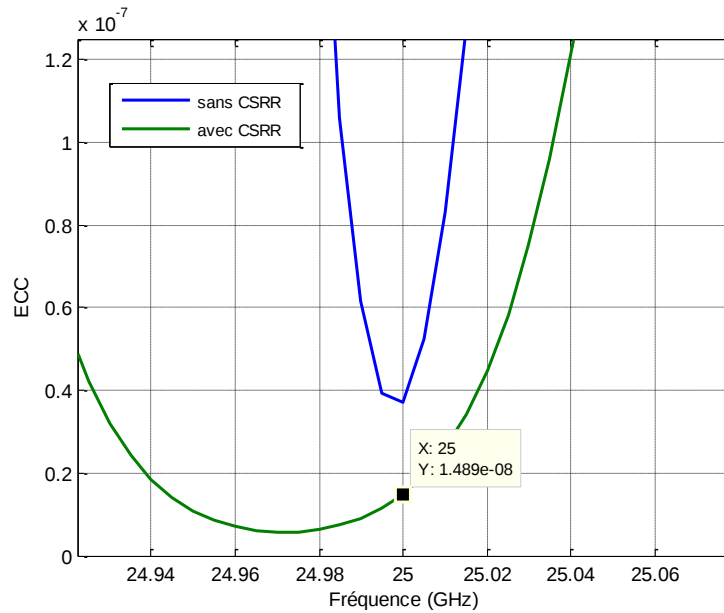


Figure III-17:ECC en fonction de la fréquence pour l'antenne MIMO sans et avec CSRR

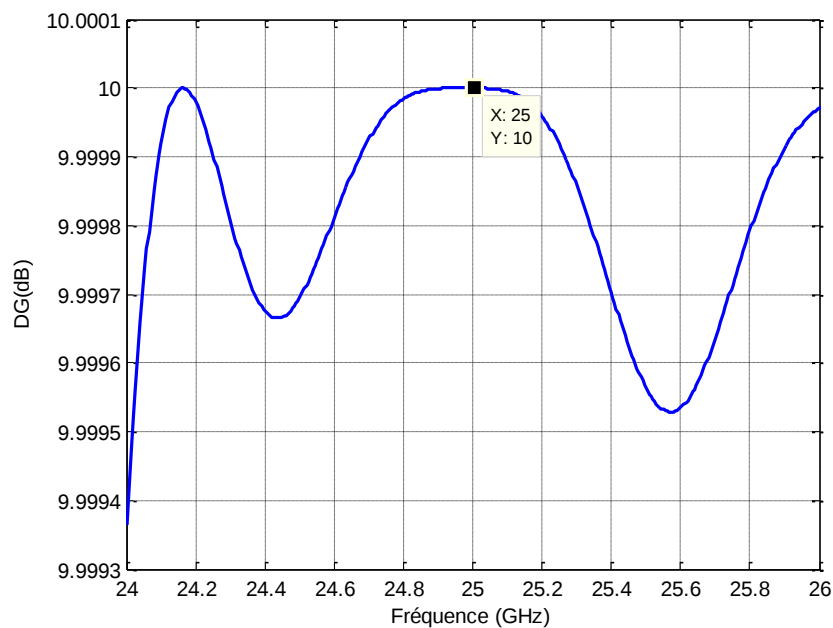


Figure III-18:gain de diversité en fonction de la fréquence

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un système multi-antennes conçu pour les applications sans fil 5G, mettant en œuvre la technique du MMTs pour minimiser le couplage mutuel entre leurs deux éléments constitutif. L'introduction d'un réseau de cellule CSRR sur le plan de masse et la surface du patch contribue à réduire le couplage mutuel entre ces éléments. En conséquence, une isolation améliorée est assurée, renforçant ainsi les performances en matière de diversité et améliorant les caractéristiques globales de rayonnement du système MIMO. Cette approche présente plusieurs avantages, notamment sa simplicité, son coût réduit, et son efficacité, ce qui en fait une solution appropriée pour les dispositifs connectés aux applications sans fil de la 5G.

### Bibliographies

- [1] Balanis, C. A., *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2016.
- [2] Hansen, R. C., *Microwave Scanning Antennas*, R. C. Hansen (ed.), Vol. 1, Academic Press, Apertures, 1964.
- [3] Gupta, I. and A. Ksienski, "Effect of mutual coupling on the performance of adaptive arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 31, No. 5, 785–791, 1983.
- [4] Bait-Suwailam, M. M., M. S. Boybay, and O. M. Ramahi, "Electromagnetic coupling reduction in high-profile monopole antennas using single-negative magnetic metamaterials for MIMO applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 58, No. 9, 2894–2902, 2010.
- [5] Pozar, D., "Input impedance and mutual coupling of rectangular microstrip antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 30, No. 6, 1191–1196, 1982.
- [6] Bamford, L., J. James, and A. Fray, "Minimising mutual coupling in thick substrate microstrip antenna arrays," *Electronics Letters*, Vol. 33, No. 8, 648–650, 1997.
- [7] Su, T. and H. Ling, "On modeling mutual coupling in antenna arrays using the coupling matrix," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 28, No. 4, 231–237, 2001.
- [8] Huang, Z., C. A. Balanis, and C. R. Birtcher, "Mutual coupling compensation in UCAs: Simulations and experiment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 54, No. 11, 3082–3086, 2006.
- [9] Nasir, J., M. H. Jamaluddin, M. R. Kamarudin, Y.-C. Lo, R. Selvaraju, et al., "A four-element linear dielectric resonator antenna array for beamforming applications with compensation of mutual coupling," *IEEE Access*, Vol. 4, 6427–6437, 2016.
- [10] Bait-Suwailam, M. M., O. F. Siddiqui, and O. M. Ramahi, "Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 876–878, 2010.
- [11] Qamar, Z., L. Riaz, M. Chongcheawchamnan, S. A. Khan, and M. F. Shafique, "Slot combined complementary split ring resonators for mutual coupling suppression in microstrip phased arrays," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 8, No. 15, 1261–1267, 2014.

- [12] Shafique, M. F., Z. Qamar, L. Riaz, R. Saleem, and S. A. Khan, "Coupling suppression in densely packed microstrip arrays using metamaterial structure," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 3, 759–763, 2015.
- [13] C.A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [14] Pendry, J. B., A. J. Holden, D. Robbins, and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No. 11, 2075–2084, 1999..
- [15] Hsue, C.-W., Y.-W. Chang, and S.-L. Jang, "Comments onabinet's principle," *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Tecchnologies (FERMAT)*, Vol. 16, No. 3, Jul.– Aug. 2016.
- [16] Falcone, F., T. Lopetegi, J. D. Baena, R. Marqu'és, F. Mart'ín, and M. Sorolla, "Effective negative-/spl epsiv/stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 14, No. 6, 280–282, 2004.
- [17] Smith, D., D. Vier, T. Koschny, and C. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Physical Review E*, Vol. 71, No. 3, 036617, 2005.
- [18] Hsieh, F.-J., C.-L. Chang, and W.-C. Wang, "Determination of effective constitutive parameters, material boundaries and properties of SRR-rod and fishnet metamaterials by Drude/Lorentz dispersion models," *PIERS Proceedings*, 136–140, Kuala Lumpur, Malaysia, Mar. 27–30, 2012.
- [19] Xiao, S., M.-C. Tang, Y.-Y. Bai, S. Gao, and B.-Z. Wang, "Mutual coupling suppression in microstrip array using defected ground structure," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 5, No. 12, 1488–1494, 2011.
- [20] Bait-Suwailam, M. M., O. F. Siddiqui, and O. M. Ramahi, "Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 876–878, 2010.
- [21] Qamar, Z., L. Riaz, M. Chongcheawchamnan, S. A. Khan, and M. F. Shafique, "Slot combined complementary split ring resonators for mutual coupling suppression in microstrip phased arrays," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 8, No. 15, 1261–1267, 2014.
- .
- [22] Raghuraman Selvaraju<sup>1</sup>, Mohd H. Jamaluddin<sup>1</sup>, \*, Muhamad R. Kamarudin<sup>2</sup>,

Jamal Nasir<sup>3</sup>, and Muhammad H. Dahri<sup>1</sup> Complementary Split Ring Resonator for Isolation Enhancement in 5G Communication Antenna Array Progress In Electromagnetics Research C, Vol.83,217–228,2018.

[23] Sharawi,M.S. Printed MIMO Antenna Engineering;Artech House :Norwood ,MA,USA,2014

### Conclusion générale

Les systèmes de communication sans fil sont principalement confrontés aux défis posés par les effets de propagation multipath, engendrés par les interactions des ondes électromagnétiques avec divers obstacles lors de leur trajet, notamment la réflexion, la diffraction et la dispersion. Ces dernières années, la recherche dans le domaine des télécommunications sans fil a permis de développer de nouvelles approches visant à améliorer à la fois le débit et la qualité de transmission. Parmi ces techniques, l'utilisation de systèmes à multiples antennes, communément désignés sous l'appellation systèmes MIMO, se révèle être l'une des solutions potentielles pour résoudre ces problèmes.

L'objectif de ce mémoire était d'étudier et concevoir une antenne MIMO à base de MMTs applicable dans le domaine de la communication 5 G. Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par la conception d'un système multi antennes basée sur une géométrie simple, constituée essentiellement de deux patch circulaires alimentés chacun par un câble coaxiale. Afin d'éviter les interférences causés par les deux éléments, nous avons inséré un réseau de cellule CSRR au niveau du plan de masse et entre les patches en surface. Les résultats de simulation montrent que l'antenne fournit une très bonne isolation qui est de l'ordre de -63.2 dB.

Ce projet a été extrêmement instructif pour nous. D'une part, il nous a donné l'opportunité d'appliquer les compétences que nous avons développées en utilisant le logiciel CST. D'autre part, il nous a également offert l'occasion d'approfondir notre compréhension des antennes imprimées, des métamatériaux et des antennes MIMO.

Le présent travail peut être perçu comme une passerelle vers d'autres travaux de recherche. Dans un premier temps, il semble pertinent de poursuivre les recherches sur les antennes MIMO miniatures en cherchant à optimiser leurs dimensions. Afin de valider les performances des antennes simulées, il revêt une grande importance de réaliser ces antennes et de procéder à des mesures sur différentes configurations qui présentent des résultats prometteurs en vue d'applications industrielles.

## Conclusion Générale

---